Deutscher Bundestag **Drucksache 18/13455**

18. Wahlperiode 29.08.2017

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Bericht

des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss) gemäß § 56a der Geschäftsordnung

Technikfolgenabschätzung (TA)

Additive Fertigungsverfahren (3-D-Druck)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorwort des Ausschusses

Additive Fertigungsverfahren sind in der Industrie seit über 25 Jahren für die Herstellung von Prototypen und hochspezialisierten Werkzeugen etabliert. Seit einigen Jahren erlauben die technischen Fortschritte zunehmend auch die additive Fertigung hochwertiger Endprodukte, was die industriellen Einsatzmöglichkeiten enorm erweitert. Die Anwendungspotenziale sind äußerst vielfältig und betreffen so diverse Branchen wie Maschinen- und Anlagenbau, Luft- und Raumfahrt, Automobil, Elektronik, Medizin, Architektur und Bauwesen, Kreativbranchen (Kunst, Design, Mode etc.), Bekleidung und Sportartikel, Spielwaren, Nahrungsmittel und nicht zuletzt auch Militär- und Rüstungstechnik. Zu konstatieren ist jedoch auch, dass additive Fertigungsverfahren in der industriellen Produktion in Deutschland – von wenigen Ausnahmen abgesehen – bisher nur in geringem Umfang zur Anwendung gelangen.

Auch im privaten Bereich gewinnt die Technik immer größere Popularität. Einfache Geräte für die additive Fertigung, sogenannte Desktop-3-D-Drucker, sind für wenige 100 Euro zu kaufen und erlauben es mittlerweile jedem, Gegenstände aus Kunststoff zuhause selber herzustellen.

Der additiven Fertigung bzw. dem privaten 3-D-Druck wird regelmäßig das Potenzial zugesprochen, die industrielle Fertigung, etablierte Wertschöpfungsketten und Warenströme sowie unseren Alltag massiv zu verändern. In der Diskussion stehen die Verfahren aber auch deshalb, weil sie Sicherheitsbedenken auslösen und Fragen der Proliferation aufwerfen. Problematisiert wird beispielsweise die Herstellung von Schusswaffen mithilfe von 3-D-Druckern durch Privatpersonen oder die ausgeprägte Dual-Use-Fähigkeit von additiven Fertigungsverfahren.

Der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung hat daher das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) mit einer Untersuchung der Potenziale, aber auch der Risiken der additiven Fertigung unter technologischen, ökonomischen, ökologischen, gesellschaftlichen und rechtlichen Gesichtspunkten beauftragt. Angesichts der potenziell enormen Bedeutung der additiven Fertigung für die internationale Wettbewerbsfähigkeit und Innovationskraft des deutschen produzierenden Gewerbes sollte ein besonderer Fokus der Untersuchung auf die absehbare Entwicklung bei der industriellen Anwendung der additiven Fertigung in Deutschland liegen.

Der Deutsche Bundestag erhält mit diesem TAB-Bericht eine wissenschaftlich fundierte Darstellung und Bewertung der aktuellen Entwicklungen in diesem Feld. Er erlaubt eine realistische Einschätzung der Potenziale und zeigt Wege auf, wie sie besser genutzt werden könnten. Darüber hinaus ermöglicht der Bericht einen differenzierten Blick auf mögliche Auswirkungen der additiven Fertigung und liefert so insgesamt eine substanzielle Informationsbasis für die weitere Befassung mit diesem für die Forschungs- und Wirtschaftspolitik wichtigen Thema.

Berlin, den 24. August 2017

Patricia Lips
Vorsitzende

Dr. Philipp Lengsfeld
Berichterstatter

René Röspel
Berichterstatter

Ralph Lenkert
Berichterstatter

Harald Ebner
Berichterstatter

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Additive Fertigungsverfahren (3-D-Druck)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) berät das Parlament und seine Ausschüsse seit 1990 in Fragen des technischen und gesellschaftlichen Wandels. Das TAB ist eine organisatorische Einheit des Instituts für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) im Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Zur Erfüllung seiner Aufgaben kooperierte es von 2003 bis 2013 mit dem Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe. Seit September 2013 besteht eine Kooperation mit dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, dem IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH sowie der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.

Claudio Caviezel
Reinhard Grünwald
Simone Ehrenberg-Silies
Sonja Kind
Tobias Jetzke
Marc Bovenschulte

Additive Fertigungsverfahren (3-D-Druck)

Innovationsanalyse

TAB-Arbeitsbericht Nr. 175

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Büro für Technikfolgen-Abschätzung
beim Deutschen Bundestag (TAB)
Neue Schönhauser Straße 10
10178 Berlin

Tel.: +49 30 28491-0
Fax: +49 30 28491-119
buero@tab-beim-bundestag.de
www.tab-beim-bundestag.de

Inhalt

Zusammenfassung 9

I. Einleitung 29

II. Anwendungen, Potenziale und Visionen 35

1. Anwendungen im industriellen und gewerblichen Bereich 36
   1.1 Prototypen- und Werkzeugbau 37
   1.2 Maschinen- und Anlagenbau, Automatisierungstechnik 38
   1.3 Luft- und Raumfahrt 39
   1.4 Automobilindustrie 42
   1.5 Elektronik 44
   1.6 Medizin 45
   1.7 Architektur und Bauindustrie 49
   1.8 Kreativbranchen 50
   1.9 Bekleidungs- und Sportartikelindustrie 51
   1.10 Spielwarenindustrie 52
   1.11 Nahrungsmittelindustrie 53
   1.12 Wissenschaft und Ausbildung 54
   1.13 Rüstungsindustrie und Streitkräfte 55

2. Anwendungen im privaten Bereich 56
   2.1 3-D-Drucker und die Makerbewegung 57
   2.2 Kosten und Leistungsvermögen aktueller 3-D-Drucker 58
   2.3 Entwicklungen im Umfeld des privaten 3-D-Drucks 59

3. Fazit 62

III. Stand der Technik und der Forschung 65

1. Überblick zu Verfahren und Materialien 65

2. Kunststoffe 68
   2.1 Schmelzschichtverfahren 68
   2.2 Stereolithografie 70
   2.3 3-D-Druckverfahren 72
   2.4 Selektives Lasersintern/Laserschmelzen 73
   2.5 Schichtlaminatverfahren 74

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

3. Metalle 74
3.1 Selektives Lasersintern/Laserschmelzen 74
3.2 Elektronenstrahlschmelzen 76
3.3 3-D-Druckverfahren 76
3.4 Schichtlaminatverfahren 77
3.5 Fluidic Force Microscopy 77

4. Keramik 77
4.1 Lithography-based Ceramic Manufacturing 78
4.2 Selektives Lasersintern 78
4.3 Solarsintern 78
4.4 Keramiken aus polymeren Vorläufersubstanzen 78

5. Baustoffe/Beton 79
5.1 D-Shape 79
5.2 Concrete Printing 80
5.3 Contour Crafting 81

6. Herausforderungen und Limitationen 82
6.1 Produktqualität 82
6.2 Anlagenperformance/Integration in Prozessketten 84

IV. Additive Fertigungsverfahren in der Industrie 87

1. Status quo und Entwicklungsperspektiven 88
1.1 Additive Fertigungsverfahren in der Industrie 88
1.2 Marktentwicklung 90
1.3 Förderaktivitäten im internationalen Vergleich 94
1.4 Betrachtung von Entwicklungsperspektiven mittels Publikations- und Patentanalysen 101

2. Entwicklungen, Potenziale und Hemmnisse für die Diffusion in die industrielle Praxis 114

3. Gestaltungsfelder 130
3.1 Anwenderbasis verbreitern 131
3.2 Barrieren abbauen 132
3.3 Inhaltliche Schwerpunkte setzen 135
3.4 Das Verständnis von Innovation erweitern 138
3.5 Die Förderung in übergeordnete Zielsetzungen einbetten 139

4. Zusammenhang und Priorisierung von Handlungsoptionen 141

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

V. Wirtschaftliche, ökologische und gesellschaftliche Auswirkungen 145

1. Ökonomische und sozioökonomische Auswirkungen 146
   1.1 Substitution von konventionellen Erzeugnissen und Fertigungsverfahren 146
   1.2 Verlagerung der Produktion 148
   1.3 Auswirkungen auf Produktionskonzepte und Logistik 149
   1.4 Arbeitsplatz- und Beschäftigungseffekte 152
   1.5 Qualifizierungsbedarfe und -möglichkeiten 155
   1.6 Wirtschaftliche Auswirkungen des privaten 3-D-Drucks 159

2. Ökologische Wirkungen der additiven Fertigung 161
   2.1 Positive ökologische Effekte 162
   2.2 Negative ökologische Effekte 163
   2.3 Stand der Forschung 164

3. Risiken für die Gesellschaft 168
   3.1 Gesundheitliche Risiken bei der Verwendung von additiven Fertigungsanlagen bzw. 3-D-Druckern 168
   3.2 Risiken der additiven Fertigung für die innere und äußere Sicherheit 173
   3.3 Fehlerhafte Produkte aus additiver Fertigung 181

VI. Rechtliche Rahmenbedingungen und Herausforderungen 183

1. Schutz des geistigen Eigentums 183
   1.1 Schutzfähigkeit für digitale 3-D-Modelle und Fertigungsvorlagen für die additive Fertigung 185
   1.2 Schutz vor Nachahmung bestehender Produkte durch additive Fertigungsverfahren 188
   1.3 Mögliche Anspruchsgegner 192
   1.4 Zwischenfazit 194

2. Produktsicherheit 195

3. Haftungsrechtliche Aspekte 198
   3.1 Fehlerhafte Produkte aus additiver Fertigung 199
   3.2 Wer steht haftungsrechtlich in der Verantwortung? 201
   3.3 Haftungsrechtliche Verantwortung von Privatpersonen 206
   3.4 Zwischenfazit 209

4. Waffenherstellung mit additiven Fertigungsverfahren 210

5. Fazit 212

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

VII. Resümee und Handlungsfelder 215

1. Additive Fertigungsverfahren in der Industrie 215
   1.1 Technologien weiterentwickeln 216
   1.2 Anwenderseitige Diffusion stärken 217
   1.3 Folgenforschung stärken 220
   1.4 Risiken für Dual-Use-Anwendungen beobachten 222
2. Privater 3-D-Druck 222
   2.1 Verbraucherschutz für Erzeugnisse aus privater Herstellung stärken 223
   2.2 Gesundheitliche Risiken durch Emissionen von 3-D-Druckern evaluieren 223
   2.3 Entwicklung der privaten additiven Waffenherstellung beobachten und gegebenenfalls Waffenrecht anpassen 223

Literatur 225

1. In Auftrag gegebenes Gutachten und Horizon-Scanning 225
2. Weitere Literatur 225

Anhang 237

1. Abbildungen 237
2. Tabellen 238
3. Abkürzungen 239
4. Qualitative Experteninterviews 240
5. Liste der teilnehmenden Experten am Workshop 242

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Zusammenfassung

»3-D-Druck leitet dritte industrielle Revolution ein« (Die Welt), »Brrrt, ssst, fertig. Zahnkronen? Spielzeug? Autoteile? Kein Problem mit 3-D-Druckern. Die Maschinen werden immer leistungsfähiger – und sie können nun die Weltwirtschaft umkrempeln« (Die Zeit), »Die chinesische Luxus-Villa aus dem 3-D-Drucker« (Die Welt). Regelmäßig erscheinen in den Medien Schlagzeilen wie diese und sie suggerieren nichts weniger als die kurz bevorstehende Erfüllung eines Menschheitstraumes: Auf Wunsch materialisiert sich jeder Gegenstand vom Spielzeug bis zum ganzen Haus auf Knopfdruck quasi von selbst. Einen wissenschaftlich fundierten Blick hinter die Hochglanzkulissen solcher Schlagzeilen zu werfen und eine möglichst realistische Einschätzung des Potenzials additiver Fertigungsverfahren zu liefern – wie die landläufig 3-D-Druck genannten Verfahren in der Industrie bezeichnet werden – ist der Auftrag, den das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) vom Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages erhalten hat.

Der vorliegende Bericht verfolgt einen breitangelegten Ansatz. Er behandelt technologische, ökonomische und ökologische Fragestellungen und beleuchtet die Technologien und Verfahren hinsichtlich möglicher gesundheitlicher Auswirkungen sowie Risiken für die innere und äußere Sicherheit. Darüber hinaus werden auch die rechtlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen (Schutz des geistigen Eigentums, Haftungsfragen) thematisiert. Angesichts der potenziell enormen Bedeutung der additiven Fertigung für die internationale Wettbewerbsfähigkeit und Innovationskraft des produzierenden Gewerbes in Deutschland liegt ein besonderer Fokus des TAB-Berichts auf den absehbaren Entwicklungen bei der industriellen Anwendung der additiven Fertigung.

Anwendungen und Potenziale

Bei der additiven Fertigung wird das gewünschte Bauteil auf der Grundlage eines digitalen 3-D-Modells durch gezieltes schichtweises Auftragen des Ausgangsmaterials sukzessive aufgebaut. Gegenüber konventionellen Verfahren wie Bohren, Fräsen, Gießen etc. weist die additive Fertigung eine Reihe von technologischen und ökonomischen Vorteilen auf:

› Es lassen sich komplexe geometrische Bauteilstrukturen realisieren, die mit konventionellen Methoden nur sehr aufwendig bzw. gar nicht herstellbar sind.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

- Die Bauteilkomplexität übt so gut wie keinen Einfluss auf Dauer und Kosten des additiven Herstellungsprozesses aus, während sie in der konventionellen Fertigung zu einem exponentiell steigenden Kosten- und Zeitaufwand führt.
- Mit additiven Fertigungsverfahren lassen sich Einzelfertigungen und Kleinserien deutlich kosteneffizienter als mit konventionellen Methoden herstellen bzw. überhaupt erst wirtschaftlich realisieren.
- Produkte können ohne großen Aufwand individuell auf Kundenwünsche zugeschnitten werden.
- Aufgrund des virtuellen Produktentwicklungsprozesses und der werkzeuglosen Fertigung können mit additiven Fertigungsverfahren deutlich kürzere Produkteinführungszeiten realisiert werden.

Der additiven Fertigung wird regelmäßig ein disruptives Potenzial zugeschrieben, weil sie nicht an die bestehenden Wissensbestände konventioneller Fertigungsverfahren anknüpfe, sondern auf einem völlig neuartigen Ansatz der Güterproduktion beruhe und damit ein neues Produktionsparadigma begründe. Demnach sei bei einem flächendeckenden Einsatz additiver Fertigungsverfahren in der industriellen Serienproduktion mit erheblichen Strukturveränderungen in den heute bestehenden Geschäftsmodellen und Wertschöpfungsketten zu rechnen.

In der Industrie sind drei Einsatzgebiete der additiven Fertigung zu unterscheiden. Beim *Rapid Prototyping* geht es um die Herstellung von Funktionsmodellen und Prototypen im Rahmen von Produktentwicklungsprozessen. *Rapid Tooling* bezieht sich auf die Herstellung von hochspezialisierten Werkzeugen und Gussformen. Für die Einsatzgebiete Rapid Prototyping und Rapid Tooling sind additive Fertigungsverfahren bereits seit über 25 Jahren fest etabliert. Die Herstellung von einbaufähigen bzw. für den Verbraucher bestimmten Endprodukten mit additiven Fertigungsverfahren wird als *Rapid Manufacturing* bezeichnet. Diese Entwicklung befindet sich noch in einer frühen Phase, sowohl was die Technologie als auch was die Erschließung von Anwendungsfeldern in der industriellen Serienproduktion angeht. Daher ist es sehr wichtig, diese drei Einsatzbereiche strikt voneinander zu unterscheiden, da anderenfalls der Reifegrad der additiven Fertigungsverfahren zur Herstellung von Endprodukten systematisch überschätzt wird.

Die Anwendungspotenziale für additive Fertigungsverfahren zur Herstellung von Endprodukten sind sehr vielfältig und betreffen so diverse Branchen wie Maschinen- und Anlagenbau, Automatisierungstechnik, Luft- und Raumfahrt, Automobilbau, Elektronik, Medizin, Architektur und Bauwesen, Kunst, Design, Bekleidung und Sportartikel, Spielwaren, Nahrungsmittel und nicht zuletzt auch Militär- und Rüstungstechnik. Die Erschließung der Potenziale steht in den allermeisten Branchen erst ganz am Anfang. Derzeit existiert lediglich eine Handvoll Vorreiterbranchen, in denen additive Produkte bereits einen

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

relevanten Marktanteil erobert haben. Dazu gehören die Dentaltechnik mit jährlich über 10 Mio. additiv hergestellten Brücken, Kronen und Zahnteilen sowie die Hörgerätetechnik, in der additive Verfahren hinsichtlich Produktivität und Qualität der konventionellen Herstellung so überlegen sind, dass bereits im Jahr 2010 40 % der Weltproduktion an Ohrpassstücken auf diesem Wege erfolgte. Unter den klassischen Industriezweigen gehört die Luft- und Raumfahrttechnik zu den Pionieren der additiven Fertigung. Vorrangiges Ziel ist hier die Herstellung geometrisch komplexer Leichtbauteile, die gegenüber konventionellen Teilen eine erhebliche Gewichtseinsparung erlauben. Über den Nutzungszyklus eines Flugzeuges kann dies zu drastischen Treibstoff- und damit Kosteneinsparungen führen, was einen unter Umständen hohen Aufwand bei der additiven Fertigung der Teile rechtfertigt.

Weitere Branchen des produzierenden Gewerbes (z.B. die Bau-, Textil- oder Nahrungsmittelindustrie) und wissenschaftliche Disziplinen (z.B. Biotechnologie) steigern stetig ihre Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen, um mit additiven Verfahrensprinzipien neue Anwendungsfelder zu erschließen. Oft handelt es sich dabei um visionäre (z.B. additiver Häuserbau, Erzeugung von funktionsfähigen menschlichen Gewebeteilen), kreative (z.B. Designkleidung, Modellfahrzeuge für Filmproduktionen) oder eher spielerische Anwendungen (z.B. Backwaren oder Zuckerskulpturen für die gehobene Gastronomie). Zumindest bei einigen dieser Anwendungen stellt sich die Frage, ob diese einen über den reinen Neuigkeitswert hinausgehenden Nutzen aufweisen.

Technik

Seit der Anmeldung des ersten Patents für ein additives Fertigungsverfahren im Jahr 1986 sind zahlreiche Varianten entwickelt worden, mit denen eine breite Palette von Ausgangsmaterialien verarbeitet werden kann. Das Ausgangsmaterial kann dabei in verschiedenen Zuständen vorliegen: als Pulver, Draht, Folie, Paste, Flüssigkeit oder auch Gas.

Da *Kunststoffe* mit extrem unterschiedlichen Eigenschaften quasi maßgeschneidert hergestellt werden können, hat sich eine große Vielfalt an kunststoffbasierten additiven Fertigungsverfahren herausgebildet. Eines der am weitesten verbreiteten Verfahren zur Verarbeitung von Kunststoffen ist das Schmelzschichtverfahren. Vergleichbar einer sehr feinen Heißklebepistole wird das – meist als dünnes Filament vorliegende – Ausgangsmaterial in einer Düse aufgeschmolzen und über einen Steuermechanismus punktuell oder linienförmig Schicht um Schicht aufgebracht. Meist weisen die damit hergestellten Objekte eine leicht stufig anmutende Oberfläche auf, weshalb oft eine Nachbehandlung erforderlich ist (z.B. Polieren). Derzeit erhältliche Anlagen für das Schmelzschichtverfahren erlauben die Herstellung von Bauteilen mit Abmessungen von

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

wenigen cm^3 bis zu mehr als 1 m^3. Sehr einfache Geräte sind für wenige hundert Euro zu kaufen, industriell einsetzbare Anlagen ab etwa 10.000 Euro. Ein weiteres kunststoffbasiertes Verfahren ist die sogenannte Stereolithografie, bei der ein lichtempfindliches Polymer mittels eines lenkbaren Laserstrahls gezielt an den Punkten ausgehärtet wird, an denen das Bauteil weiter wachsen soll. Damit sind sehr feine Strukturen (unterhalb 0,1 µm) herstellbar.

Metalle haben gegenüber Kunststoffen einen wesentlich höheren Schmelzpunkt. Daher sind für additive Fertigungsverfahren zur Verarbeitung von *Metallen,* in denen das Schmelzen und Wiedererstarren eine Rolle spielt, wesentlich höhere Energieeinträge notwendig. Hierfür kommen typischerweise technisch aufwendige und teure Hochleistungslasersysteme zum Einsatz. Dies ist der Hauptgrund dafür, dass die additive Fertigung von Metallteilen vor allem in der Industrie von Interesse ist und sich für Privatanwender eher nicht eignet. Das selektive Lasersintern/Laserschmelzen ist das am weitesten verbreitete additive Fertigungsverfahren für Metalle; die Kosten einer typischen industriell einsetzbaren Anlage liegen bei etwa 70.000 Euro. Eine Vielzahl an Werkstoffen kann verwendet werden, darunter Edel- und Werkzeugstähle, Aluminium- und Titanlegierungen, Kobalt-Chrom-Legierungen sowie hochtemperaturfeste Nickellegierungen.

Keramiken besitzen einen höheren Schmelzpunkt als Metalle, weswegen sie noch schwerer als diese mit additiven Fertigungsverfahren zu verarbeiten sind. Da allerdings auch konventionellen Fertigungsverfahren enge Grenzen gesetzt sind (Keramiken lassen sich nur schwer gießen, schmieden oder zerspanend bearbeiten) und es mittels additiver Fertigungsverfahren auch möglich ist, die Porosität eines Werkstückes auf eine Weise zu beeinflussen, wie es mit keinem konventionellen Verfahren möglich ist, eröffnet sich hier ein völlig neuer Horizont für innovative Anwendungen, z.B. für Filter, Katalysatorträger oder biokompatible Oberflächen.

Ganz generell unterscheiden sich die verschiedenen Verfahren sehr stark in ihren Funktionsprinzipien und Eigenschaften wie auch hinsichtlich der Eigenschaften der damit gefertigten Produkte. Zu den wesentlichen Unterscheidungsmerkmalen gehören u.a.

- die Palette der verarbeitbaren Ausgangsmaterialien,
- die mögliche Größe und Geometrie der Werkstücke,
- die Genauigkeit der Fertigung,
- die Geschwindigkeit der Fertigung,
- die mechanischen, optischen oder elektrischen Eigenschaften der Produkte,
- die Einsatzzwecke der Produkte (z.B. für industrielle Anwendungen)
- und nicht zuletzt die Kosten der Fertigung.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Herausforderungen und Grenzen

Derzeit bestehen noch diverse technische Grenzen, die einem breiteren Einsatz von additiven Fertigungsverfahren in der industriellen Produktion, insbesondere für größere Serien, im Wege stehen. Zu nennen sind hier

- die langsame Prozessgeschwindigkeit,
- das kleine Bauvolumen,
- die geringe Feinheit der erzeugbaren Details,
- die mangelnde Reproduzierbarkeit,
- unzureichende Materialeigenschaften bzw. Oberflächengüte sowie
- die eingeschränkte Palette der verarbeitbaren Materialien.

Je nach Verfahren und eingesetzten Materialien kommen diese Limitationen in unterschiedlichem Ausmaß zum Tragen.

Ein großes Manko für den industriellen Einsatz ist, dass beim gegenwärtigen Stand der Technik und Forschung bereits kleine Abweichungen in den Ausgangsbedingungen große Wirkungen entfalten können. So ist es durchaus möglich, dass selbst auf zwei baugleichen additiven Fertigungsanlagen mit demselben Ausgangsmaterial bei gleich eingestellten Prozessparametern (z.B. Temperatur, Geschwindigkeit des Druckkopfes/Lasers) keine völlig identische Produktqualität erzielt werden kann.

Beim Herstellungsprozess entstehen oft thermisch induzierte innere Spannungen oder ein Verzug in den Bauteilen, die deren Qualität beeinträchtigen können. Darüber hinaus bestehen hinsichtlich der Bruchfestigkeit, des Alterungs- und Langzeitverhaltens sowie des Verhaltens gegenüber mechanischen Wechselbelastungen derzeit noch erhebliche Unsicherheiten bzw. Wissenslücken. Funktionstests realer Bauteile in praxisnahem Einsatz oder die zerstörende Materialprüfung sind sehr aufwendig und kostspielig, was insbesondere bei Einzelanfertigungen bzw. Kleinstserien problematisch ist. Hier ist es erforderlich, neue Konzepte der Qualitätssicherung zu entwickeln.

Damit die additive Fertigung auch für die industrielle Serienproduktion von größeren Stückzahlen attraktiver werden kann, muss die Leistungsfähigkeit der Verfahren weiter gesteigert werden. Erforderlich ist dabei nicht nur eine Beschleunigung des additiven Fertigungsvorgangs selbst, sondern auch die Minimierung bzw. Automatisierung der heute noch manuell vorzunehmenden vor- und nachgelagerten Produktionsschritte.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

3-D-Druck im privaten Bereich

Begünstigt durch das Auslaufen der ersten Patente für additive Fertigungsverfahren setzte vor rund 10 Jahren die Entwicklung von technisch einfachen, dafür aber auch für Privatpersonen erschwinglichen 3-D-Druckern ein, mit denen einfache Gegenstände aus Kunststoff hergestellt werden können. Ein wesentlicher Treiber hierfür war und ist die sogenannte Makerbewegung (Maker: englisch für Hersteller oder Schöpfer), die sich aus Hobbybastlern, Tüftlern, Do-it-yourself-Enthusiasten und Hackern speist, denen das Bedürfnis gemeinsam ist, mit eigenen Mitteln Neues und Individuelles zu schaffen. Zentrale Leitbilder sind Vernetzung, Austausch und der Open-Source-Gedanke. Über Onlineplattformen werden Ideen und Bauanleitungen in Form von digitalen 3-D-Modellen sowie Erfahrungen öffentlich geteilt, diskutiert und gemeinschaftlich weiterentwickelt. Damit verknüpft ist das Entstehen sogenannter Makerspaces oder Fabrication Laboratories (FabLabs), bei denen es sich um offene Werkstätten handelt, die als Treffpunkte und Orte des Wissensaustauschs und gemeinschaftlicher Arbeit dienen.

Insbesondere auch dank der technischen Weiterentwicklung der Geräte und Software hinsichtlich ihrer Benutzerfreundlichkeit gewinnt der private 3-D-Druck immer stärkere Popularität weit über die Makerbewegung hinaus. Gleichwohl lassen sich damit nicht alle möglichen Gegenstände quasi automatisch auf Knopfdruck herstellen: Nach wie vor ist die Bedienung eines 3-D-Druckers stark durch Experimentier- und Konfigurationsarbeit geprägt, und bei komplexeren Geometrien sind Fehldrucke keine Seltenheit.

Heute verfügbare Geräte basieren ganz überwiegend auf dem in Bezug auf die Verfahrenstechnik und Handhabung vergleichsweise einfachen Schmelzschichtverfahren zur Verarbeitung von Kunststoffen. Infolge der einfachen Gerätetechnik sind Produkte aus dem privaten 3-D-Drucker im Hinblick auf Qualität, Präzision und Materialeigenschaften keinesfalls mit Erzeugnissen aus industriellen additiven Fertigungsanlagen gleichzusetzen. Andere Materialien (Metalle, Keramiken) bleiben aufgrund der anspruchsvollen und kostenintensiven Verfahrenstechniken (z.B. mittels leistungsfähiger Lasersysteme) bis auf Weiteres dem (semi)professionellen Bereich vorbehalten.

Additive Fertigungsverfahren in der Industrie

Über die bereits seit Jahren etablierten Einsatzgebiete der additiven Fertigung zur Herstellung von Prototypen und Werkzeugen hinaus richtet sich derzeit das Hauptinteresse der Industrie auf die Erschließung der Anwendungspotenziale für die Herstellung von Endprodukten. Daher wurden im vorliegenden Bericht

bestehende Barrieren und Hemmnisse bei der Durchdringung additiver Fertigungsverfahren in die Industrie besonders in den Blick genommen, um politische Gestaltungsoptionen zur Förderung der Diffusion abzuleiten.

Status quo und Entwicklungsperspektiven

Additive Fertigungsverfahren zur Herstellung von Endprodukten befinden sich in Deutschland, aber auch in anderen technisch führenden Ländern in einer frühen Diffusionsphase in die Industrie. Mit einer flächendeckenden Verbreitung ist in den kommenden 10 Jahren nicht zu rechnen. Zum einen verfügen die Verfahren noch nicht über die erforderlichen technischen Leistungsmerkmale für eine industrielle Serienproduktion. Zum anderen zeichnet sich die konventionelle industrielle Serienproduktion vor allem im Bereich der Mittel- und Großserie heute durch ein Höchstmaß an betriebswirtschaftlicher Effizienz aus, das mittels additiver Fertigungsverfahren in absehbarer Zeit nicht erreichbar erscheint, selbst wenn die derzeit bestehenden technischen Probleme gelöst werden könnten. Daher werden Potenziale für additive Fertigungsverfahren heute insbesondere bei hochspezialisierten Anwendungen in der Einzel- und Kleinserienfertigung gesehen.

Deutschlands Stärke im internationalen Vergleich besteht vor allem auf der Entwickler- und Herstellerseite im Bereich der Verfahren, Materialien und Fertigungsanlagen, was im Besonderen für metallbasierte Verfahren zutrifft. Einige der weltweit führenden Anbieter von additiven Fertigungsverfahren zur Metallverarbeitung sind in Deutschland beheimatet. Bei den kunststoffbasierten additiven Fertigungsverfahren, die vor allem im Konsum- und Privatanwenderbereich von großer Bedeutung sind, dominieren hingegen Anbieter aus den USA.

Dagegen existieren erhebliche Schwächen auf der Anwenderseite, vor allem im Vergleich mit den USA. Hierzulande konzentriert sie sich auf einige wenige Großunternehmen (u.a. Siemens, MTU, Airbus, Automobilhersteller) und kleine und mittlere Unternehmen (KMU) innerhalb eines eher engen Branchenkreises in der Luft- und Raumfahrtindustrie, Automobilindustrie sowie in der Medizin- und Energietechnik. Im Kontrast dazu besteht in den USA eine hohe Vielfalt bei den Industrieakteuren. Hierzu gehören sowohl Großunternehmen als auch viele unterschiedliche KMU. Die Verbreiterung der industriellen Anwenderbasis in Deutschland ist daher eine zentrale Herausforderung der kommenden Jahre.

Aufgrund ihrer höheren Anschlussfähigkeit an konventionelle Verfahren haben hybride Verfahren, d.h. Kombinationen aus konventionellen und additiven Verfahren, in den kommenden 5 bis 10 Jahren das Potenzial, die Schaffung von neuem Know-how im Bereich der additiven Fertigung in Deutschland voranzutreiben. Derzeit verfolgen deutsche Akteure offenbar eine Innovationsroute

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

mittels kleiner inkrementeller Schritte. Die Entwicklung völlig neuer Produkte und Geschäftsmodelle und damit die Erschließung disruptiver Potenziale der additiven Fertigung stehen bislang weniger im Fokus.

Nichttechnische Barrieren

Neben der für eine Serienproduktion derzeit noch nicht ausreichenden technischen Reife additiver Fertigungsverfahren besteht eine Reihe von nichttechnischen, betrieblichen und strukturellen Hemmnissen für eine beschleunigte Diffusion in breite Anwendungsbereiche hinein.

Ein begrenzender Faktor ist die mangelnde Verfügbarkeit einer breiten Palette an Materialien und Werkstoffen für die additive Fertigung. Hersteller von additiven Fertigungsanlagen beschränken die Materialien, die mit ihrer Anlage verarbeitet werden können, meist nach wie vor auf einige wenige Ausgangsstoffe bestimmter Hersteller. In der Folge gehen Anwender beim Kauf einer additiven Fertigungsanlage eine relativ große Abhängigkeit gegenüber den Material- und Werkstoffherstellern ein. Eine stärkere Entkopplung von Materialien und Verfahren wäre wichtig, um einer Monopolisierung entgegenzuwirken und eine Verbreiterung der Hersteller- und Anwenderbasis zu erreichen.

Insbesondere KMU fehlen oftmals entscheidungsrelevante Informationen, da es für additive Fertigungsverfahren noch weitgehend an Branchen- und Technologiestandards fehlt. In Verbindung mit der Vielfalt an unterschiedlichen Verfahren führt dies dazu, dass viele KMU bei der Identifikation von Anwendungspotenzialen, neuen Geschäftsmodellen und der passenden Einstiegstechnologie Schwierigkeiten haben. Das Risiko einer Investition in ein Verfahren, das sich in der Folge als untauglich erweisen könnte, wird von manchen KMU als zu hoch bewertet. Hinzu treten vielfältige Herausforderungen bei der Erschließung des technischen Know-hows zum Einsatz der Verfahren, da die erforderlichen Kompetenzen und Qualifikationen vielfach nicht in ausreichendem Maße vorhanden sind. Da in Deutschland in Bereichen mit den gegenwärtig größten Anwendungspotenzialen für die additive Fertigung (hochspezialisierte Anwendungen in der Einzel- und Kleinserienfertigung) vorrangig KMU aktiv sind, wirken sich diese Faktoren stark diffusionshemmend aus.

Gestaltungsfelder

Im Laufe des Projektes wurden fünf Gestaltungsfelder herausgearbeitet, in denen unterschiedliche Akteure tätig werden könnten, um die Diffusion von additiven Fertigungsverfahren in die deutsche Industrielandschaft zu unterstützen. Diese lauten:

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

- Anwenderbasis verbreitern,
- Barrieren abbauen,
- inhaltliche Schwerpunkte setzen,
- Verständnis von Innovation erweitern sowie
- Förderung in übergeordnete Zielsetzungen einbetten.

Die Maßnahmen betreffen keineswegs nur die öffentliche Hand und die Politik (Bundestag, Ministerien auf Bundes- und Landesebene, Institutionen der Forschungsförderung etc.), sondern auch Akteure aus Wissenschaft (z.B. Universitäten, angewandte Forschung), Wirtschaft (KMU und Großunternehmen) oder Intermediäre (z.B. Verbände, Kammern).

Anwenderbasis verbreitern

Ein Ansatzpunkt zur Verbreiterung der Anwenderbasis additiver Fertigungsverfahren ist die konsequente Integration aller Wertschöpfungspartner bei technologischen Entwicklungsprojekten durch entsprechende Ausrichtung der Förderpolitik. Gute Voraussetzungen, um als Diffusionsmotor zu wirken, besitzen KMU, die sich als technische Prozessspezialisten positioniert haben, also Unternehmen, die spezielle technische Lösungen für ihre industriellen Kunden entwickeln und ausführen sowie produktbegleitende Dienstleistungen im Bereich der Prozessentwicklung anbieten. Dies könnte durch gezielte Förderung stimuliert werden. Um den Informations- und Erfahrungsaustausch zu fördern, würde sich die Unterstützung von branchen- bzw. technologieübergreifenden Austauschplattformen anbieten. Als positiver Nebeneffekt dieser Maßnahmen können sich gegebenenfalls frühzeitig Kunden- oder Lieferantenbeziehungen zwischen Industriepartnern etablieren, sodass die Wachstums- und Innovationsimpulse im Land bleiben und bestehende Bindungen in industriellen Wertschöpfungs- und Innovationsnetzwerken gefestigt werden.

Barrieren abbauen

Eine der zentralen Barrieren, die oft und insbesondere bei KMU dem Einsatz neuer additiver Fertigungstechnologien im Wege steht, ist ein Informations- und Qualifikationsdefizit. Dieser Bedarf nach praxis- und entscheidungsrelevantem Know-how sollte auf verschiedenen Ebenen zielgruppenspezifisch gedeckt werden. Als Erstes sollten Angebote für eine auf die einzelnen Akteursgruppen zugeschnittene technologische Einstiegsberatung entwickelt werden. Darüber hinaus könnten Hersteller bzw. Entwickler von additiven Fertigungsanlagen ihr Angebot an Schulungen ausbauen, Kammern und Branchenverbände könnten sich verstärkt bei Weiterbildungsangeboten engagieren und nicht zuletzt wären Lehrinhalte in den Curricula von Hochschulen und Bildungseinrichtungen an den Bedarf anzupassen. Begleitend hierzu könnten die Entwick-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

lung eines »Kompetenzatlas additive Fertigungsverfahren« oder die Förderung breiter angelegter Informationsmaßnahmen (Präsentation von Demonstratoren, Darstellung guter Anwendungsbeispiele etc.) wichtige Hilfestellungen bieten. Da Investitionen in neue Maschinen und Produktionsanlagen aufgrund der geringeren Ressourcenausstattung gerade für KMU mit erheblichen Risiken und Unsicherheiten verbunden sind, besteht ein möglicher Ansatz der Forschungs- und Innovationspolitik in der Förderung zur Einrichtung von Pilotfabriken/-linien bzw. Forschungsproduktionslinien, in welchen im vorwettbewerblichen Rahmen eine spätere industrielle, serielle Fertigung unter möglichst realen Bedingungen erforscht bzw. erprobt werden könnte.

Inhaltliche Schwerpunkte setzen

Nicht zuletzt aufgrund der großen Vielfalt an unterschiedlichen Verfahren, für die es nach wie vor weitgehend an Standards und Normen fehlt, fällt der Einstieg in die additive Fertigung insbesondere KMU schwer. Vor diesem Hintergrund wäre zu überlegen, ob die Technologieförderung in Deutschland stärker auf einige für die breite industrielle Anwendung besonders relevante Kernverfahren konzentriert werden sollte, anstatt die bestehende Vielfalt der Verfahren in der Breite zu fördern und dadurch eventuell sogar noch zu erweitern. Zur Auswahl der Kernverfahren wäre ein diskursiver Auswahl- und Diskussionsprozess unter Einbeziehung aller relevanten Akteure aus industrieller Entwicklung und Anwendung, Wissenschaft, Verbänden und der Politik empfehlenswert.

Verständnis von Innovation erweitern

Die Forschungsförderung in Deutschland orientiert sich stark an technologischen Entwicklungszielen. Dies blendet nichttechnische Innovationsfelder aus, wie beispielsweise die Nutzung avancierter organisatorischer Maßnahmen, neue produktbegleitende Dienstleistungen oder neue Geschäftsmodelle. Diese sind für Unternehmen ebenfalls wichtige und vergleichsweise kostengünstige Stellschrauben zur Steigerung ihrer Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit, und nicht selten scheitert die Umsetzung neuer technischer Prozesse oder Produkte daran, dass die zur erfolgreichen und effizienten Umsetzung erforderlichen organisatorischen Strukturen nicht angelegt sind. Eine Möglichkeit wäre es, Maßnahmen zu fördern, die Unternehmen für die Problematik sensibilisieren und befähigen, passfähige Lösungen selbstständig zu erarbeiten und umzusetzen (z.B. Innovationsplattformen).

Eng damit verbunden ist auch die Empfehlung an Unternehmen, sich zukünftig gegenüber neuen Innovationsimpulsen beispielsweise aus der Makerbewegung oder weiteren neuen, teilweise industriefremden Akteuren zu öffnen,

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

um sich mittels neuer Innovationsformen, wie z.B. Co-Creation oder Open Innovation, die daraus entstehenden Innovationsimpulse zu erschließen. Unterstützt werden könnte dies durch die stärkere Stimulierung entsprechender Strukturen und Aktivitäten in der Projektförderung.

Förderung in übergeordnete Zielsetzungen einbetten

Die bislang fehlende Adressierung von Umweltauswirkungen und gesellschaftlichen Folgen sowie die Querverbindungen zur politisch stark priorisierten Industrie-4.0-Thematik legen nahe, dass das Thema zu additiver Fertigung ebenfalls eine Einbettung in den übergeordneten strategischen Politikdiskurs benötigt. Die Synergien liegen auf der Hand: Einerseits wird es einfacher, Anwendungspotenziale der additiven Fertigung (z.B. neue Geschäftsmodelle im Ersatzteil- und Servicebereich, Einsatz im Rahmen hybrider Fertigungsverfahren) durch die durchgängige Vernetzung und Digitalisierung der industriellen Fertigung zu realisieren. Andererseits können additive Fertigungsverfahren ein niedrigschwelliger Einstieg in das Thema Industrie 4.0 insbesondere für prozessorientierte KMU und Mittelständler der Einzel- und Kleinserienfertigung sein. Im Unterschied zu für viele KMU zunächst abstrakten Digitalisierungslösungen stellen sich der Nutzen bzw. die neuen technischen Möglichkeiten bei der additiven Fertigung vergleichsweise konkreter dar.

Förderung in Deutschland im internationalen Vergleich

Die USA, aber auch beispielsweise Großbritannien oder Japan, deren verarbeitendes Gewerbe in den vergangenen Jahrzehnten stark eingebrochen ist, erhoffen sich von der additiven Fertigung wichtige Impulse für eine Reindustrialisierung der heimischen Wirtschaft. Ferner stellt in vielen Industriestaaten das übergeordnete Ziel der Digitalisierung der Produktion einen wichtigen Grund für die Förderung der additiven Fertigung dar, welcher – anders als in Deutschland – eine zentrale Rolle in den jeweiligen Digitalisierungsstrategien beigemessen wird.

Bereits 2012 rief die Regierung der *USA* das Programm »National Network of Manufacturing Innovation« (NNMI) ins Leben, in dessen Rahmen im selben Jahr das National Additive Manufacturing Innovation Institute (NAMII, auch als America Makes bekannt) gegründet wurde. Ziel ist es, die Diffusion additiver Fertigungsverfahren in die Industrie zu beschleunigen, neue Anwendungsfelder zu erschließen und den Zugang für kleinere Unternehmen zu Pilot- und Produktionsanlagen zu fördern. Dafür standen bisher 55 Mio. US-Dollar aus dem Bundeshaushalt zur Verfügung, weitere 55 Mio. US-Dollar steuerten die Industrie, Universitäten und einige Bundestaaten bei. Für die nächsten 5 Jahre sind weitere 75 Mio. US-Dollar eingeplant.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Was staatliche Förderaktivitäten in *China* angeht, sind die öffentlich zugänglichen Informationen (zumindest in englischer Sprache) lückenhaft und zum Teil auch widersprüchlich. Laut Medienberichten kündigte die chinesische Regierung 2013 ein mit 245 Mio. US-Dollar dotiertes Technologieförderprogramm zur additiven Fertigung an, welches über drei, anderen Quellen zufolge über 7 Jahre laufen soll. Im Februar 2015 veröffentlichte das Ministerium für Industrie und Informationstechnologien den »Additive Manufacturing Industry Promotion Plan 2015–2016«. Ziele sind u.a., jährliche Wachstumsraten von mindestens 30 % zu erreichen sowie in bestimmten Anwendungsbereichen (u.a. der Luftfahrt) an die internationale Spitze vorzudringen.

In *Deutschland* existiert bislang keine übergeordnete politische Förderstrategie für die additive Fertigung, wie es sie in den USA oder offenbar in China gibt. Die Bundesregierung setzt bei der additiven Fertigung analog zu anderen Technologiebereichen primär auf die institutionelle Förderung sowie die Projektförderung des Bundes. Laut Angaben der Bundesregierung wurden zwischen 2003 und 2013 im Rahmen der Projektförderung über 21 Mio. Euro an Fördermitteln vergeben. Seit 2013 wurden die Förderaktivitäten des Bundes deutlich ausgebaut, einerseits für spezifische Forschungsvorhaben zu einzelnen Anwendungsbereichen der additiven Fertigung, andererseits auch für Teilvorhaben in großen, technologieoffenen Förderprogrammen. Hier zu nennen ist beispielsweise das Projekt »Additiv-Generative Fertigung – Die 3D-Revolution zur Produktherstellung im Digitalzeitalter AGENT 3D« (Laufzeit: 2013–2020) im Rahmen des Regionalförderprogramms des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) »Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation«, für welches der Bund bis zu 45 Mio. Euro zur Verfügung stellt. Durch Industriebeteiligungen soll das Projektbudget um weitere 45 Mio. Euro anwachsen, wodurch es zu Europas größtem Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Bereich der additiven Fertigung würde. Im Jahr 2015 veröffentlichte das BMBF mit der Förderrichtlinie »Additive Fertigung – Individualisierte Produkte, komplexe Massenprodukte, innovative Materialien (ProMat_3D)« erstmals eine spezifische Fördermaßnahme zur additiven Fertigung. Damit ist Deutschland im internationalen Vergleich insgesamt gut aufgestellt, was die staatliche Forschungs- und Entwicklungsförderung im Bereich der additiven Fertigung angeht. Die Förderung ist stark technologieorientiert, während die wirtschafts- und sozialwissenschaftliche (Begleit-)Forschung bislang von nachrangiger Bedeutung ist.

Auswirkungen der additiven Fertigung

Ausgehend vom aktuell noch frühen Entwicklungsstadium von additiven Fertigungsverfahren dominieren technologische Entwicklungsziele die laufenden nationalen und internationalen Forschungsanstrengungen. Eine wirtschafts- und

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

gesellschaftswissenschaftliche Forschung, die den Blick auf mögliche mittel- bis langfristige Auswirkungen und Folgen der additiven Fertigung richtet, ist erst im Entstehen begriffen.

In Anbetracht der sehr lückenhaften Wissensbestände wurden für den vorliegenden Bericht lediglich einige Aspekte herausgegriffen und der Versuch unternommen, Zusammenhänge und Wirkmechanismen zu beschreiben. Da es sich generell um eine in vielerlei Hinsicht offene Entwicklung handelt, sind belastbare Einschätzungen oder richtungssichere Prognosen derzeit nicht möglich, insbesondere auch weil Strukturbrüche nicht auszuschließen, aber nur äußerst schwer vorauszusehen sind. Insgesamt besteht ein umfassender wirtschafts- und sozialwissenschaftlicher Forschungsbedarf.

Wirtschaftliche Auswirkungen

Es ist anzunehmen, dass additive Fertigungsverfahren vielfältige wirtschaftliche Auswirkungen haben werden, die in komplexer Weise miteinander interagieren und hochgradig abhängig von den betrachteten Branchen und Anwendungskontexten der Produkte sind.

Substitution konventioneller Erzeugnisse und Fertigungsverfahren

Eine offensichtliche Folge einer wachsenden Verbreitung additiver Fertigungsverfahren in der industriellen Produktion wäre ein rückläufiges Wertschöpfungspotenzial für die entsprechenden konventionell gefertigten Produkte, aber auch für die hier eingesetzten Produktionsmittel (konventionelle Werkzeuge, Formen, Maschinen und Produktionsanlagen) und Halbzeuge (Bleche, Profile, Rohre etc.). Die additive Fertigung wird daher oft als potenzielle Bedrohung für die etablierten, konventionell ausgerichteten Produzenten wahrgenommen, da nicht nur ihr bisheriges Geschäftsmodell zunehmend erodieren, sondern gleichzeitig auch der vorhandene Erfahrungsschatz zu konventionellen Konstruktions- und Fertigungsweisen an Bedeutung verlieren könnte. Zugleich aber stehen den etablierten Produzenten vielfältige Möglichkeiten offen, ihre Geschäftsmodelle an die veränderten Rahmenbedingungen anzupassen, um ihre Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten und mithilfe der additiven Fertigung gegebenenfalls zu steigern. Die Frage, ob die additive Fertigung für etablierte Produzenten eher ein Risiko darstellt oder vielmehr neue Chancen bietet, lässt sich somit nur für jedes einzelne Unternehmen beantworten und hängt entscheidend davon ab, ob rechtzeitig auf die sich abzeichnenden Veränderungen reagiert wird und es gelingt, die Möglichkeiten der additiven Fertigung aktiv zu nutzen.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Verlagerung der Produktion

Es ist eine offene Frage, ob bzw. in welchem Ausmaß die additive Fertigung eine Rückverlagerung der industriellen Warenproduktion in Hochlohnländer (sogenanntes Reshoring) stimulieren könnte. Dafür spricht, dass durch die Möglichkeiten der Automatisierung manueller Einzelschritte die relative Bedeutung der Lohnkosten sinken könnte. Außerdem könnte es zur Realisierung der neuen Möglichkeiten für kundenindividuelle Produkte vorteilhaft sein, die Produktion nahe an den Käufermärkten anzusiedeln. Aber auch der gegenteilige Effekt ist denkbar: Technologisch bisher weniger fortschrittliche Länder könnten vom vergleichsweise niedrigschwelligen Einstieg in die additive Fertigung profitieren, um ihren Rückstand zu den Industrieländern abzubauen. Komplexe und qualitativ hochwertige Bauteile könnten dann künftig in wachsendem Maße auch in Schwellenländern hergestellt werden. Welcher dieser beiden möglichen Effekte letztlich überwiegen wird, ist derzeit nicht seriös zu beantworten.

Auswirkungen auf Produktionskonzepte und Logistik

Prinzipiell erlaubt es die additive Fertigung, dass Güter über größere Distanzen hinweg nicht mehr physisch, sondern als digitale 3-D-Modelle über das Internet transportiert werden. Das könnte dazu führen, dass die vorherrschenden Produktionsstrukturen – zentrale Produktionsstandorte, Produktion auf Lager, Verteilung der Ware über Zentrallager in die Käufermärkte – zunehmend abgelöst werden durch viele kleine, geografisch breit gestreute Produktionsstandorte, die eine flexible und bedarfsorientierte Produktion für regionale Kunden erlauben und ohne große Lager- und Transportkapazitäten auskommen.

Dieser Umbruch lässt sich gut am Beispiel der Ersatzteilproduktion illustrieren: Bislang müssen beispielsweise für langlebige Haushaltsgeräte, Autos etc. Ersatzteile (bzw. die Werkzeuge für deren Herstellung) in riesigen Lagerhallen über lange Jahre vorgehalten werden. Bei Bedarf müssen sie unter Umständen über Tausende von Kilometern zum defekten Gerät transportiert werden. Bei einer additiven Ersatzteilproduktion könnten diese nicht nur nach Bedarf, sondern auch gleich direkt vor Ort hergestellt werden. Anstelle einer umfangreichen Ersatzteillogistik müssten Hersteller nur noch einen Computerserver unterhalten, auf dem die jeweiligen digitalen 3-D-Modelle gespeichert wären.

Arbeitsplatz- und Beschäftigungseffekte

Wie bei jedem technologischen Fortschritt, der Effizienzverbesserungen in der Produktion mit sich bringt, ist auch bei der additiven Fertigung mit Auswirkungen auf die Art und Anzahl der Beschäftigten zu rechnen. In der Regel wird dies mit Arbeitsplatzverlusten assoziiert, da bisher anfallende manuelle Arbeitsschritte durch einen automatisierten maschinellen Ablauf ersetzt werden. Die

additive Fertigung führt allerdings nicht alleine zu einer höheren Effizienz, sondern bietet auch Möglichkeiten für Produktverbesserungen und attraktivere Dienstleistungen (z.B. schnellere Lieferzeiten, individuelle Produkte). Unter geeigneten Rahmenbedingungen könnten negative Beschäftigungseffekte infolge von Effizienzgewinnen daher durch die steigende Nachfrage nach additiv gefertigten Produkten kompensiert werden, zumindest so lange, bis die entsprechenden Märkte eine Sättigung erreichen.

Werden einfachere manuelle Arbeitsschritte mithilfe der additiven Fertigung automatisiert, kann dies für die Unternehmensmitarbeiter in einem substanziellen Qualifizierungsbedarf resultieren. Der Umstieg bzw. die Umschulung dürfte ihnen in Abhängigkeit von den bereits vorhandenen Kompetenzen unterschiedlich schwerfallen. Insbesondere für Facharbeiter, die bislang einen Großteil ihres Berufslebens in der manuellen Produktion tätig gewesen sind, könnte die additive Fertigung durch ihren Schwerpunkt auf Bildschirmarbeit und Anlagenbedienung unter Umständen ein Gefühl der Entfremdung von ihrer Arbeit auslösen, was ihre Bereitschaft, sich auf die neuen Fertigungsverfahren einzulassen, senken könnte. Die Auswirkungen der additiven Fertigung auf die Beschäftigten dürften damit je nach Branche bzw. im Einzelfall für jedes Unternehmen sehr unterschiedlich ausfallen.

Auswirkungen des privaten 3-D-Drucks

Das Szenario rückt in den Bereich des Vorstellbaren, dass 3-D-Drucker weit über die technikaffine Makerbewegung hinaus großflächige Verbreitung auch bei weniger technikversierten Privatanwendern finden, die künftig ihren Bedarf an diversen Alltagsprodukten (Geschirr, Einrichtungsgegenstände, Modeaccessoires, Ersatzteile etc.) im wachsenden Maße durch Eigenproduktion decken. Es ist meistens dieses Szenario, das die enorme Faszination für das Thema 3-D-Druck in der breiten Öffentlichkeit speist. Ob und, wenn ja, wann und in welcher Ausprägung es Realität werden könnte, darüber sind zurzeit nur Spekulationen möglich, was umso mehr für die damit verbundenen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Auswirkungen gilt. Unabdingbare Voraussetzung hierfür wäre eine substanzielle Weiterentwicklung der Technologie, denn heute verfügbare Geräte erlauben bestenfalls die Herstellung einfacher Objekte aus Kunststoff.

Selbst wenn fortschrittliche 3-D-Drucker in Zukunft die Herstellung hochqualitativer Erzeugnisse erlauben sollten, ist es unwahrscheinlich, dass der Konsument der Zukunft seinen Warenbedarf größtenteils zu Hause herstellt: Für die allermeisten Produkte wäre dies gar nicht sinnvoll, da sie mit den Methoden der konventionellen Massenfertigung auch künftig preiswerter, schneller, ressourcenschonender und in Bezug auf die Produktqualität und -sicherheit besser herzustellen sein werden. Viel realistischer erscheint daher das Szenario, dass die

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

überwiegende Zahl der Nutzer 3-D-Drucker nur gelegentlich für spezielle Anwendungen verwendet, etwa um auf Basis digitaler 3-D-Modelle aus dem Internet originelle Geschenke, individuelles Spielzeug oder einfache, schnell benötigte Ersatzteile zu fertigen.

Insgesamt gesehen bleibt somit abzuwarten, ob sich das Phänomen des privaten 3-D-Drucks weiterhin so dynamisch weiterentwickelt oder ob es sich rückblickend nur als ein vorübergehender Hype erweist.

Ökologische Auswirkungen

Additiven Fertigungsverfahren werden häufig positive Umweltwirkungen zugeschrieben. Ein Hauptargument hierfür ist die angenommene hohe Materialeffizienz im Fertigungsprozess, da nur dasjenige Ausgangsmaterial benötigt wird, das im fertigen Bauteil steckt. Im Gegensatz dazu entstehen bei der konventionellen Fertigung oft Reste (Verschnitt, Späne etc.). Darüber hinaus erlaubt die additive Fertigung die Erschließung von Leichtbaupotenzialen durch neuartige, gewichtsoptimierte Strukturen. Schließlich sollen durch die Möglichkeiten zur Dezentralisierung der Produktion Einsparungen bei Transport, Logistik und Verpackungsmaterial realisierbar sein.

Es existieren allerdings auch Effekte, die negative ökologische Wirkungen nach sich ziehen können. Materialabfälle in der Nachbearbeitung (z.B. Entfernen von Stützstrukturen, Oberflächenbehandlung durch Schleifen etc.) können die Materialeffizienz im Fertigungsprozess wieder relativieren. Gerade die laserbasierten additiven Fertigungsverfahren zeichnen sich durch einen hohen Energieverbrauch im Fertigungsprozess aus. Zu berücksichtigen ist ferner auch der Energieverbrauch bei der Herstellung der Ausgangsmaterialien, der bei den pulverförmigen Materialien hoch sein kann. Schließlich könnte das Recycling von additiv hergestellten Produkten problematisch sein, insbesondere wenn sie aus einem Materialmix bestehen.

Wie sich die diversen mutmaßlichen positiven und negativen ökologischen Effekte in einer Gesamtbilanz über den gesamten Lebenszyklus eines additiv gefertigten Produktes im Vergleich mit einem aus konventioneller Herstellung darstellen, ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch völlig unklar.

Gesundheitliche Risiken

Während des additiven Fertigungsprozesses kann es je nach Verfahren und verwendeten Materialien zu Emissionen von Kleinstpartikeln und/oder gasförmigen Substanzen kommen, die sich in der Atemluft anreichern und unter Umständen eine Gefahr für die Bediener der Anlagen darstellen können. Findet der

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Einsatz der additiven Fertigung im industriellen Bereich statt, dürften solche Risiken in der Regel ohne Weiteres durch die Einhaltung der relevanten Vorschriften und Auflagen des Arbeitsschutzes beherrschbar sein (z.B. durch Schutzausrüstung).

Als problematischer ist die Situation dagegen für Anwendungen im nichtindustriellen Bereich einzuschätzen, in welchem es möglicherweise an den erforderlichen Kenntnissen, Ressourcen und Ausstattungen zur Vermeidung bzw. Minderung von potenziellen Gesundheitsrisiken fehlt. Hierzu zählt der Einsatz von 3-D-Druckern oder semiprofessionellen Anlagen im privaten Bereich, in FabLabs, Schulen oder Universitäten. Auch wenn es derzeit keine Hinweise auf erhebliche gesundheitliche Risiken und somit Bedarf für Schutzvorkehrungen gibt, ist der Erkenntnisstand hierzu noch unbefriedigend. Auch angesichts immer neuer Geräte- und Materialentwicklungen erscheint eine kontinuierliche Forschung zur Gefährdungsbeurteilung angezeigt.

Risiken in Bezug auf die innere und äußere Sicherheit

Regelmäßig werden Befürchtungen geäußert, dass additive Fertigungsverfahren dazu missbraucht werden könnten, um unerlaubt Gegenstände zu fertigen, die der staatlichen Kontrolle unterliegen. In diesem Zusammenhang problematisiert wird insbesondere die Herstellung von Schusswaffen durch Privatpersonen oder andere nichtstaatliche Akteure mit kriminellen oder terroristischen Absichten. Obwohl Versuche gezeigt haben, dass mit heute handelsüblichen 3-D-Druckern gefertigte Schusswaffen – wenn überhaupt – nur sehr unzuverlässig funktionieren, besteht angesichts des schnellen technischen Fortschritts in diesem Feld kein Anlass, die Risiken zu unterschätzen. Solche Waffen lassen sich nicht nur vergleichsweise einfach und im Verborgenen auch von Personen ohne spezifische Waffenkenntnisse herstellen, sondern sie bestehen auch weitestgehend aus Kunststoff und sind somit mit Metalldetektoren nur schwer zu erkennen. Existierende Sicherheitssysteme (z.B. an Flughäfen) und staatliche Schutz- und Kontrollmechanismen (z.B. Waffenregistrierung) können damit vergleichsweise einfach ausgehebelt werden. Entsprechend wird das Thema von den Sicherheitsbehörden weltweit sehr ernst genommen. In Deutschland befassen sich u.a. das Bundeskriminalamt, die Bundespolizei, der Bundesnachrichtendienst sowie die Luftsicherheitsbehörden intensiv mit der Untersuchung und Bewertung möglicher Gefährdungen durch additiv gefertigte Waffen(teile).

Auch im militärischen und sicherheitspolitischen Kontext könnten additive Fertigungsverfahren eine Rolle spielen. Aufgrund ihrer ausgeprägten Flexibilität sind die Verfahren prädestiniert für Dual-Use-Anwendungen. Sie könnten die technologische Schwelle dafür senken, dass Länder bzw. nichtstaatliche Akteure komplexe Komponenten moderner Waffensysteme (Drohnen, Triebwerke für

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Lenkraketen etc.) und andere Rüstungsgüter selbstständig herstellen. Bestehende Ausfuhrbeschränkungen für sensible Rüstungs- und Dual-Use-Güter könnten aufgrund der hochgradig virtuellen additiven Prozesskette unterlaufen werden, da digitale 3-D-Modelle sich leichter illegal über Landesgrenzen bringen lassen als materielle Güter. Zugleich erhöht sich das Risiko für Technologiespionage bzw. -diebstahl. Insgesamt könnte die additive Fertigung somit der Proliferation von Rüstungstechnologien Vorschub leisten, weshalb es erste Überlegungen gibt, zumindest die Ausfuhr besonders leistungsstarker additiver Fertigungsanlagen und dazugehöriger Ausgangsmaterialien genehmigungspflichtig zu machen.

Rechtliche Rahmenbedingungen

Die Besonderheiten der additiven Fertigung werfen viele rechtliche Fragestellungen auf. Dies betrifft insbesondere den Schutz geistigen Eigentums, die Produktsicherheit sowie haftungsrechtliche Fragen.

In Bezug auf den *Schutz des geistigen Eigentums* gibt es zahlreiche ungeklärte Fragen hinsichtlich der Schutzfähigkeit von digitalen 3-D-Modellen für die additive Fertigung wie auch in Bezug auf den Schutz bestehender Produkte vor Nachahmung mithilfe additiver Fertigungsverfahren. Auch ist noch offen, wie im Kontext einer individualisierten Produktion die *Herstellerpflichten bezüglich der Produktsicherheit* eingehalten werden können, da gängige Methoden der Qualitätssicherung nicht oder nur schwer anzuwenden sind. In *haftungsrechtlichen Streitfällen* dürfte vor allem die Frage nach den haftungsverantwortlichen Produktherstellern häufig Schwierigkeiten bereiten, da aufgrund der regelmäßig vielen Beteiligten an dem in weiten Teilen virtuellen Produktentstehungsprozess komplexe Akteurskonstellationen typisch sind. Offen ist beispielsweise auch die Frage, ob der Bediener einer additiven Fertigungsanlage, der lediglich ein fremdgeschaffenes digitales 3-D-Modell auf die Anlage überspielt und den Fertigungsvorgang auslöst, als Hersteller im Sinne des Haftungsrechts zu qualifizieren ist und damit haftungsrechtlich in der Verantwortung für Produktfehler steht.

Die teilweise unklare Rechtslage ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass sich infolge der jungen Technologie noch keine konsolidierte Rechtsprechung speziell zur additiven Fertigung entwickeln konnte. Nach vorherrschender Meinung reichen die bestehenden Normen aus, um im Wege der Auslegung für Rechtsklarheit zu sorgen. Aus heutiger Sicht ist somit kein akuter gesetzgeberischer Handlungs- bzw. Regelungsbedarf zu konstatieren. Nicht auszuschließen ist jedoch, dass sich gegebenenfalls vorhandene Regelungslücken erst dann manifestieren, wenn die ersten komplexeren Streitfälle vor Gericht verhandelt werden. Insgesamt gesehen ist daher eine aktive Beobachtung der Entwicklungen in diesem Gebiet anzuraten, damit eventuell entstehende Regelungslücken zeitnah erkannt und zügig geschlossen werden können.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Herausforderungen in Bezug auf die Durchsetzung bestehender Regelungen im Kontext der additiven Fertigung ergeben sich insbesondere durch die zunehmende Verfügbarkeit von erschwinglichen additiven Fertigungsanlagen im gewerblichen und privaten Bereich, die neuen Akteuren einen vergleichsweise niedrigschwelligen Einstieg in eine eigene Fertigung bieten. Viele dieser neuen Akteure und insbesondere Privatpersonen werden regelmäßig nur unzureichend mit den geltenden Vorschriften zur Produktsicherheit und -haftung vertraut bzw. oft auch gar nicht in der Lage sein, die ihnen obliegenden Pflichten regelkonform einzuhalten. Inwieweit sich dies zu einem Risiko für die Verbraucher entwickelt und ob es gegebenenfalls perspektivisch notwendig wird, den Verbraucherschutz hinsichtlich solcher Produkte zu stärken, bleibt abzuwarten und ist von der weiteren Entwicklung abhängig.

Schlussbetrachtung

Der universelle Replikator, der jeden gewünschten Gegenstand quasi von selbst materialisiert, ist ein weitverbreitetes Zukunftsnarrativ. Additive Fertigungsverfahren bzw. 3-D-Drucker scheinen diese Zukunft möglich zu machen. Es erstaunt daher nicht, dass die additive Fertigung in der Öffentlichkeit und den Medien eine enorme Faszination auslöst. Es ist aber auch ein mächtiges Motiv, um Aufmerksamkeit zu generieren oder die Notwendigkeit umfangreicher Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen zu begründen, weil anderenfalls die nächste industrielle Revolution verpasst werden könnte.

Dabei hat diese industrielle Revolution durch additive Fertigungsverfahren – meist weitgehend unbeobachtet von einer breiteren Öffentlichkeit – in Teilbereichen bereits stattgefunden (z.B. im Prototypen- und Werkzeugbau) oder ist aktuell im vollen Gange (z.B. in der Dental- und Hörgerätetechnik). In anderen Bereichen steht sie vor der Tür (in der Luftfahrt und Medizintechnik) oder gilt zumindest als sehr wahrscheinlich (z.B. in der Ersatzteilproduktion). In einigen Branchen und Anwendungsfeldern könnten sich die Erwartungen aber auch als stark überzogen und rückblickend als Hype erweisen (z.B. Häuser oder Ersatzorgane aus dem 3-D-Drucker). Denn in einem Punkt unterscheiden sich additive Fertigungsverfahren nicht von anderen Fertigungstechnologien: Von der Anwendungsidee bis zum routinemäßigen industriellen Einsatz bzw. marktfähigen Produkt ist es ein weiter, oft mühevoller Weg. Neben prozesstechnischen Weiterentwicklungen müssen auch materialwissenschaftliche Fortschritte erzielt, Technologiestandards entwickelt oder neue Konzepte für die Qualitätssicherung entworfen werden. Anstelle einer Revolution findet somit eher eine Evolution statt, die bereits vor rund 30 Jahren ihren Anfang genommen hat.

Zur Realisierung der attraktiven Potenziale der additiven Fertigung in vielfältigen Anwendungsfeldern reicht es allerdings nicht aus, lediglich auf den wis-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

senschaftlich-technischen Fortschritt zu vertrauen. Von zentraler Bedeutung ist die Überwindung von nichttechnischen Barrieren, die der weiteren Verbreitung von additiven Fertigungsverfahren in die industrielle Praxis häufig im Wege stehen. In den bestehenden, überwiegend an technologischen Entwicklungszielen ausgerichteten Forschungs- und Entwicklungsprogrammen fand dies bisher wenig Beachtung. Um das Innovationsgeschehen möglichst umwelt- und sozialverträglich sowie ökonomisch langfristig ertragreich zu gestalten, sollte daher die wirtschafts- und sozialwissenschaftliche (Begleit-)Forschung energisch vorangetrieben werden. Orientierungs- und Entscheidungswissen wird als Lotsenfunktion benötigt, um Chancen frühzeitig identifizieren und Risiken umschiffen zu können. Das Einbeziehen eines breiteren Akteursspektrums ist eine wichtige Voraussetzung dafür, die technologischen Entwicklungen besser mit den gesellschaftlichen Bedarfen und Anforderungen zu verzahnen.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Einleitung I.

Das Thema 3-D-Druck beflügelt seit einigen Jahren viele Fantasien über die Warenproduktion der Zukunft. Dabei geht es nicht nur um die Frage, *wie* Produkte künftig entstehen, sondern vor allem auch darum, *wer* sie *wo* fertigt und *was* fortan hergestellt werden kann. Genährt werden entsprechende Fantasien nicht zuletzt durch die in immer kürzeren Abständen erscheinenden Medienberichte über technische Durchbrüche, neue Anwendungsfelder und mögliche Auswirkungen auf unser Leben, deren Überschriften die Zukunft häufig bereits vorwegnehmen:

- »3D-Drucker. Der Star-Trek-Replicator wird Realität« (FAZ, 5.3.2013),
- »Fabrik auf dem Schreibtisch. Ich baue mir die Welt – Wie 3D-Drucker unseren Alltag revolutionieren« (Focus Online, 15.5.2014),
- »3-D-Druck leitet dritte industrielle Revolution ein« (Die Welt, 2.6.2014),
- »Autos in 3-D. Auf die Straße gedruckt« (Der Tagesspiegel, 28.3.2015),
- »Die chinesische Luxus-Villa aus dem 3-D-Drucker« (Welt.de, 29.4.2015),
- »Revolution. Essen aus dem 3D-Drucker« (FAZ, 24.8.2015),
- »Gottes Bauplänen auf der Spur: Organe entstehen im 3D-Drucker« (Rhein-Zeitung, 19.4.2016).

Anders als das stark angewachsene mediale und öffentliche Interesse für das Thema es vermuten lässt, handelt es sich bei der Technik des 3-D-Drucks bzw. bei der *additiven Fertigung,* wie sie in der Industrie genannt wird, keineswegs um eine neue Fertigungstechnologie. Seit rund 3 Jahrzehnten werden in der Industrie unterschiedliche additive Fertigungsverfahren für die Herstellung von Prototypen, Modellen, Werkzeugen und Gussformen eingesetzt. Weil hier die Produkte durch schichtweises Auftragen der Materialien entstehen, können beinahe beliebig geformte Erzeugnisse gefertigt werden. Dabei übt die Bauteilkomplexität so gut wie keinen Einfluss auf Dauer und Kosten der Fertigung aus.

Die stark gestiegene Aufmerksamkeit für das Thema ist auf zwei jüngere, voneinander weitgehend unabhängige Entwicklungen zurückzuführen, die sich seit einigen Jahren in diesem Technologiefeld vollziehen. Zum einen erlaubt es der technisch-wissenschaftliche Fortschritt bei Verfahren und Materialien, dass über Prototypen und Werkzeuge hinaus zunehmend auch hochwertige Endprodukte additiv gefertigt werden können. Dadurch erweitern sich die Anwendungsmöglichkeiten enorm, was das aktuell außerordentlich hohe Interesse an diesen Verfahren in der Industrie erklärt. Zum anderen setzte vor rund 10 Jahren – begünstigt durch das Auslaufen von Patenten – die Entwicklung von technisch zwar noch relativ simplen, dafür aber auch für Privatpersonen erschwinglichen 3-D-Druckern ein, die es plötzlich jedem erlaubte, selber zu Hause Gegenstände

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

aus Kunststoff herzustellen. Seitdem gewinnen diese Geräte immer größere Popularität auch bei weniger technikaffinen Nutzern, in Schulen oder Universitäten, was durch rapide steigende Verkaufszahlen für 3-D-Drucker eindrücklich bestätigt wird.

Beide Entwicklungen – der industrielle Einsatz additiver Fertigungsverfahren zur Herstellung von Endprodukten und der private 3-D-Druck – üben eine besondere Faszination auf die Öffentlichkeit und die Medien aus, nähren sie doch insgesamt die Utopie einer universellen Maschine, mit der jeder nach Belieben materielle Objekte herstellen kann, angefangen vom Spielzeug über Autos und Nahrungsmittel bis zum ganzen Haus.

Beauftragung, Zielsetzung und Gutachtenvergabe

Ohne einen wissenschaftlich fundierten Blick auf die additiven Fertigungstechnologien könnten sich schnell falsche Vorstellungen über die (aktuelle und künftige) Leistungsfähigkeit der Verfahren und überzogene Erwartungen an deren Anwendungspotenziale entwickeln. Aus diesem Grund hat der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung das TAB mit der Erarbeitung einer Innovationsanalyse zum Thema »Additive Fertigungsverfahren (3-D-Druck)« beauftragt, die anhand einer systematischen Darstellung und Bewertung der Entwicklungen in diesem Feld eine möglichst realistische Einschätzung des Potenzials der additiven Fertigung liefern, aber zugleich auch den Blick auf mögliche Auswirkungen und Folgen der Verfahren richten soll.

Als besondere Herausforderung für das Projekt erwies sich, dass Entwicklungen in den Blick zu nehmen waren, die sich gerade erst abzeichneten. Die Projektkonzeption sah deshalb vor, sich in einer ersten Phase der Methode des Horizon-Scannings zu bedienen, um verlässliche Hinweise auf die künftige Bedeutung der additiven Fertigung in unterschiedlichen (industriellen wie privaten) Anwendungsfeldern sowie daraus resultierende Auswirkungen zu erhalten. Das Horizon-Scanning wurde im Zeitraum August 2014 bis März 2015 durch die Projektbeteiligten des TAB-Konsortialpartners VDI/VDE-IT, Dr. Simone Ehrenberg-Silies, Dr. Sonja Kind, Tobias Jetzke und Dr. Marc Bovenschulte durchgeführt. Dazu wurden in einem hypothesengeleiteten und durch Experteninterviews gestützten Untersuchungsansatz aktuelle Texte (Presseartikel, Beiträge in Technologiemagazinen, wissenschaftliche Studien, Publikationen von Unternehmen und Forschungseinrichtungen, Interviews, Blogeinträge) gesichtet und ausgewertet.

Einer der Kernbefunde lautete, dass additive Fertigungsverfahren in der industriellen Produktion in Deutschland – abgesehen von wenigen spezifischen Anwendungen – bisher nur in geringem Umfang zur Anwendung gelangen, und dies, obwohl viele der hierzulande zentralen Industriebranchen gute Rah-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

menbedingungen bieten. Vor diesem Hintergrund und angesichts der potenziellen Bedeutung der additiven Fertigung für die internationale Wettbewerbsfähigkeit und Innovationskraft des produzierenden Gewerbes in Deutschland wurden daher die folgenden Schwerpunkte als besonders bedeutsam eingestuft:

- Skizzierung der Anwendungs- und Entwicklungsperspektiven der industriellen additiven Fertigung in den kommenden 5 bis 10 Jahren;
- Beschreibung von Hemmnissen und Barrieren, die der breiteren Anwendung in Deutschland im Wege stehen;
- Darstellung der politischen Gestaltungsmöglichkeiten, um die Entwicklungen in diesem Feld aktiv zu befördern.

Zur weiteren Vertiefung dieser im Horizon-Scanning identifizierten Schwerpunkte wurde ein Gutachten an das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI vergeben (Autoren: Dr. Oliver Som, Dr. Axel Thielmann, Dr. Esther Schnabl, Dr. Stephanie Daimer, Hendrik Berghäuser, Oliver Rothengatter). Im Rahmen des Gutachtens wurde ein Thesenpapier (Kap. IV.2) zu den absehbaren Entwicklungen, Hemmnissen und Gestaltungsfeldern bei der Anwendung additiver Fertigungsverfahren in der deutschen Industrie erstellt, das auf einem Projektworkshop mit Abgeordneten des Deutschen Bundestages und Experten aus Wissenschaft, Industrie und Behörden sowie mit Vertretern von Verbänden und Gewerkschaften diskutiert wurde. Die Ergebnisse des Workshops dienten u.a. der Ableitung akteursspezifischer Gestaltungsoptionen zur Förderung der Diffusion der additiven Fertigung in die deutsche Industrie.

Durch die Schwerpunktsetzung auf die Anwendungs- und Entwicklungsperspektiven der industriellen additiven Fertigung in Deutschland mussten andere mögliche Vertiefungsthemen in den Hintergrund rücken (u.a. eine vertiefte Analyse wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Auswirkungen sowie eine erschöpfende Ausarbeitung der rechtlichen Rahmenbedingungen mithilfe externer Gutachten). Diese Vorgehensweise schien logisch und gerechtfertigt, da ohne vertiefte Erkenntnisse über die zu erwartende Verbreitung der additiven Fertigung in die industrielle Praxis mögliche Folgewirkungen z.B. auf die Kooperationsbeziehungen zwischen Unternehmen oder die Beschäftigten in der Produktion nicht seriös abgeschätzt werden können.

Die Verantwortung für die Auswahl und Zusammenführung der Informationen aus dem Horizon-Scanning, dem Gutachten des Fraunhofer ISI sowie weiteren im Bericht genannten Quellen liegt bei den Hauptautoren des vorliegenden Abschlussberichts, Dr. Claudio Caviezel und Dr. Reinhard Grünwald. Allen Mitautorinnen und Mitautoren des Gesamtberichts ebenso wie den genannten Gutachterinnen und Gutachtern sowie den Expertinnen und Experten, die am Workshop teilnahmen, sei für ihre engagierte Kooperation in dem Projekt und ihre Diskussionsbereitschaft sehr herzlich gedankt. Ein besonderer

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Dank gebührt Prof. Dr. Dr. Jürgen Ensthaler sowie seinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern am Lehrstuhl für Wirtschafts-, Unternehmens- und Technikrecht an der Technischen Universität Berlin für die fachliche Unterstützung in Bezug auf rechtliche Fragestellungen und die kritische Kommentierung von Entwürfen zu Kapitel VI des vorliegenden Berichts. Ein herzlicher Dank geht schließlich an Dr. Christoph Revermann und Dr. Arnold Sauter für die Durchsicht des Berichtsentwurfs und die zahlreichen Verbesserungsvorschläge sowie an Brigitta-Ulrike Goelsdorf und Marion Birner für die Aufbereitung der Abbildungen und die Erstellung des Endlayouts.

Aufbau des Berichts

Der vorliegende Bericht verfolgt einen breitangelegten Ansatz und behandelt sowohl technologische wie auch ökonomische, ökologische und rechtliche Fragestellungen.

Ausgehend von der Feststellung, dass gegenwärtig sehr unterschiedliche Vorstellungen über Einsatzmöglichkeiten und -potenziale der additiven Fertigung bestehen, werden in Kapitel II (*Anwendungen, Potenziale und Visionen*) bereits bestehende und in absehbarer Zukunft möglicherweise erschließbare Einsatzfelder der additiven Fertigung im industriellen und privaten Bereich systematisch dargestellt und diskutiert. Dabei zeigt sich zweierlei: Zum einen steht die Erschließung von Anwendungsfeldern und -potenzialen in den meisten Branchen noch am Anfang. Zum anderen gibt es eine Reihe von Anwendungsideen, deren Nutzen gegenüber einer konventionellen Fertigung nicht erkennbar ist.

Der *Stand der Technik und Forschung* wird in Kapitel III behandelt. Zur Illustration der gegenwärtigen technischen Möglichkeiten, aber auch der Limitationen und Grenzen der additiven Fertigung werden die Charakteristika ausgewählter additiver Fertigungsverfahren zur Verarbeitung von Kunststoffen, Metallen, Keramiken sowie Zement/Beton beschrieben und diskutiert.

Der Fokus des Kapitels IV (*Additive Fertigungsverfahren in der Industrie*) richtet sich auf die industriellen Anwendungs- und Entwicklungsperspektiven der additiven Fertigung in Deutschland in den kommenden 5 bis 10 Jahren. Dazu werden 18 Thesen zu den Entwicklungsperspektiven, Hemmnissen und Gestaltungsoptionen formuliert. Wesentliche Grundlage hierfür bilden zum einen Publikations- und Patentanalysen, die Rückschlüsse auf die Dynamiken hinsichtlich der technologischen Entwicklung sowie der relevanten Akteure, Branchen und Länder im internationalen Vergleich erlauben. Zum anderen wurden Experteninterviews durchgeführt, um bestehende nichttechnische Barrieren und Hemmnisse für die Diffusion der additiven Fertigung in die Industrie zu identifizieren. Aus den Thesen werden Gestaltungsfelder zur Förderung der Diffusion abgeleitet, die sich nicht nur an die öffentliche Hand und die Politik

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

richten, sondern auch an Akteure aus der Wirtschaft, der Wissenschaft, den Verbänden und Kammern.

Kapitel V hat mögliche *wirtschaftliche, ökologische und gesellschaftliche Auswirkungen* der additiven Fertigung zum Gegenstand. Die Folgenabschätzung stellt derzeit eine große Herausforderung dar, da sie auf noch sehr lückenhaften theoretischen und empirischen Wissensständen aufbauen muss. Deshalb werden lediglich einige Aspekte herausgegriffen sowie Zusammenhänge und Wirkmechanismen beschrieben. Belastbare Einschätzungen oder sichere Prognosen sind derzeit noch nicht möglich.

Kapitel VI widmet sich den *rechtlichen Rahmenbedingungen und Herausforderungen*. Relevant sind insbesondere die Bereiche Schutz des geistigen Eigentums, Gewährleistung und Produkthaftung, für die im Kontext der additiven Fertigung eine noch in vielen Punkten unklare Rechtslage zu konstatieren ist. Darüber hinaus wird der bestehende Rechtsrahmen im Hinblick auf die Waffenherstellung mit 3-D-Druckern diskutiert, da regelmäßig Befürchtungen über daraus resultierende Gefahren geäußert werden. Angesichts der Komplexität der rechtlichen Materie beschränken sich die Ausführungen in diesem Kapitel allerdings auf eine kursorische Darstellung, die weder Anspruch auf Vollständigkeit erhebt noch abschließende Bewertungen von offenen Rechtsfragen bieten kann.

Das abschließende Kapitel VII (*Resümee und Handlungsfelder*) fasst die aus politischer Perspektive wichtigsten Erkenntnisse und Gestaltungsfelder konzentriert zusammen.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Anwendungen, Potenziale und Visionen II.

Im Gegensatz zu den konventionellen subtraktiven (Drehen, Bohren, Fräsen etc.) und formativen Fertigungsverfahren (Schmieden, Gießen, Biegen etc.) werden bei den additiven Fertigungsverfahren Bauteile durch schichtweises Auftragen von Volumenelementen hergestellt. Der Fertigungsprozess erfolgt computergesteuert auf der Grundlage eines digitalen 3-D-Modells des Werkstückes (eine ausführliche Darstellung der verschiedenen additiven Fertigungsverfahren erfolgt in Kap. III). Abgesehen von der additiven Fertigungsanlage, den Rohmaterialien und Software sind typischerweise keine weiteren Herstellungswerkzeuge erforderlich, wodurch die additive Fertigung gegenüber konventionellen Verfahren eine Reihe von technologischen und ökonomischen Vorteilen aufweist (Fraunhofer ISI 2016, S. 37 ff.; Heil 2014, S. 10 ff.):

- Für die Produktion neuer Werkstücke sind keine werkstückspezifischen Werkzeuge wie Gussformen oder Produktionsanlagen herzustellen bzw. anzuschaffen. Mit additiven Fertigungsverfahren lassen sich Einzelfertigungen (Losgröße 1) und Kleinserien deutlich kosteneffizienter als mit konventionellen Methoden herstellen bzw. überhaupt erst wirtschaftlich realisieren. Bei höheren Losgrößen allerdings sind konventionelle Massenfertigungsverfahren aufgrund von Skaleneffekten in der Regel wirtschaftlicher.
- Aufgrund des virtuellen Produktentwicklungsprozesses und der werkzeuglosen Fertigung können mit additiven Fertigungsverfahren deutlich kürzere Produkteinführungszeiten realisiert werden.
- Die Produktindividualisierung wird durch additive Fertigungsverfahren maßgeblich erleichtert bzw. überhaupt erst rentabel, da hierzu lediglich die zugrunde liegenden digitalen 3-D-Modelle zu modifizieren sind. Ebenso lässt sich die Produktion schnell an Nachfrageänderungen anpassen, was insbesondere in Branchen mit kurzen Produktlebenszyklen von Vorteil ist.
- Die additive Fertigung erlaubt vollkommen neue Ansätze im Produktdesign, da fertigungsgerechte Konstruktionsweisen nicht bzw. nur noch in Ansätzen erforderlich sind (Peters 2015, S. 40). Es lassen sich komplexe geometrische Bauteilstrukturen realisieren, die mit konventionellen Methoden nur sehr aufwendig bzw. produktionstechnisch gar nicht herstellbar sind. Dabei übt die Bauteilkomplexität so gut wie keinen Einfluss auf Dauer und Kosten des additiven Herstellungsprozesses aus, während sie in der konventionellen Fertigung zu einem exponentiell steigenden Kosten- und Zeitaufwand führt.
- Die neuen Gestaltungsfreiheiten erlauben eine an die jeweilige Anwendung optimal angepasste Werkstückgeometrie. Dies ermöglicht Leistungssteigerungen (z. B. Leichtbaustrukturen, Werkzeuge mit integrierten Kühlkanä-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

len) sowie die Verringerung der Zahl an Einzelkomponenten in den Bauteilen. Letzteres reduziert die Montagekomplexität und -arbeit und damit einhergehende Fehlerquellen in der Produktion.

› Da mit dem 3-D-Modell alle zur Herstellung eines Produktes erforderlichen Voraussetzungen digital vorliegen, kann die Fertigung mit vergleichsweise geringem apparativem Aufwand dezentral erfolgen. Beispielsweise kann ein Kunde ein gewünschtes Produkt vor Ort auf der eigenen bzw. einer zur Verfügung gestellten additiven Fertigungsanlage herstellen, wobei er das erforderliche digitale 3-D-Modell im Internet vom Originalhersteller bezieht. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für Geschäftsmodelle und Produktionsstrukturen (Kap. V.1).

Angesichts dieser Besonderheiten wird der additiven Fertigung regelmäßig ein disruptives oder gar revolutionäres Potenzial zugeschrieben, weil sie nicht an die bestehenden Wissensbestände konventioneller Fertigungsverfahren anknüpft, sondern auf einem völlig neuartigen Ansatz der Güterproduktion beruht und damit ein neues Produktionsparadigma begründet. Demnach wäre bei einem flächendeckenden Einsatz additiver Fertigungsverfahren in der industriellen Serienproduktion mit erheblichen bis gravierenden Strukturveränderungen in den heute bestehenden Geschäftsmodellen und Wertschöpfungsketten zu rechnen (Fraunhofer ISI 2016, S. 19; dazu Kap. V).

Dass die aktuellen Entwicklungen davon aber noch weit entfernt sind, zeigt ein detaillierterer Blick auf die bereits bestehenden sowie in absehbarer Zukunft möglicherweise erschließbaren Einsatzfelder der additiven Fertigung.

Anwendungen im industriellen und gewerblichen Bereich 1.

Der Reifegrad und das Leistungsvermögen der additiven Fertigungsverfahren für industrielle Anwendungen sind je nach Verfahren und Einsatzfeld sehr unterschiedlich ausgeprägt. Der Stand der Technik reicht von ersten experimentellen Ansätzen über frühe Markteinführungen bis hin zu schon seit vielen Jahren etablierten Standardverfahren. Im Folgenden werden sowohl bereits erschlossene Einsatzfelder als auch sich neu abzeichnende Einsatzmöglichkeiten der additiven Fertigung anhand ausgewählter Anwendungsbeispiele beschrieben. Die Darstellung orientiert sich in großen Teilen an dem im Rahmen des TAB-Projekts durchgeführten Horizon-Scanning zum Thema (VDI/VDE-IT 2015).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Prototypen- und Werkzeugbau 1.1

Rapid Prototyping

Die ersten additiven Fertigungsverfahren wurden vor über 30 Jahren für die Herstellung von Prototypen entwickelt (Rapid Prototyping). Seitdem werden kunststoffbasierte Verfahren wie die Stereolithografie (Kap. III.1.2) in den unterschiedlichsten Branchen für die Herstellung von Konzept-, Design-, Ergonomie- und Funktionsmodellen in frühen Stadien der Produktentwicklung eingesetzt. Der zentrale Vorteil besteht in der schnellen, kostengünstigen und detailgetreuen Umsetzung digital vorliegender Produktentwürfe in reale Objekte. Dies wirkt sich stark verkürzend auf die Produktentwicklungszeiten aus (Berger et al. 2013, S. 27).

Rapid Tooling

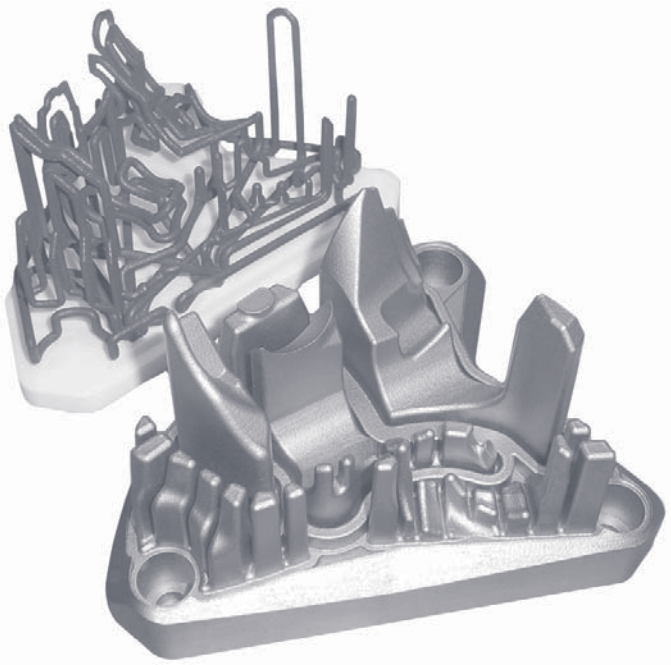
Seit Beginn der 1990er Jahre werden additive Fertigungsverfahren auch für die Herstellung von Werkzeugen und Gussformen für die konventionelle Fertigung eingesetzt (Rapid Tooling). Da es sich bei Werkzeugen und Formen vielfach um Einzelanfertigungen handelt, zählt der Werkzeug- und Formenbau in der konventionellen Produktion zu den teuersten und zeitintensivsten Arbeitsschritten. Hier erlauben additive Fertigungsverfahren nicht nur Kosten- und Zeitersparnisse, sondern bieten gleichzeitig auch Möglichkeiten, zusätzliche Funktionalitäten in die Werkzeuge zu integrieren (VDI/VDE-IT 2015, S. 10). Abbildung II.1 zeigt einen additiv gefertigten Spritzgießwerkzeugeinsatz mit integrierten konturnah geführten Kühlkanälen, der mit konventionellen Verfahren nicht realisierbar wäre. Die konturnahe Kühlung bietet zahlreiche Vorteile im Gießprozess, darunter Qualitätsverbesserungen durch homogeneren Kunststoff, reduzierte Ausschussquoten durch Vermeiden von Verzug oder eine Verkürzung der Spritzgießzykluszeiten durch kürzere Kühlzeiten (Berger et al. 2013, S. 55).

Als Werkstoffe kommen sowohl Metalle als auch Kunststoffe oder mineralische Materialien zum Einsatz (Berger et al. 2013, S. 31 ff.). Der in Abbildung II.2 gezeigte Sandkern für den Sandguss eines Turbinenrads beispielsweise lässt sich mithilfe des 3-D-Druckverfahrens (Kap. III.2.3) in nur 5 Tagen für 900 Euro in einem Stück herstellen, während eine konventionelle Fertigung bis zu 6 Wochen in Anspruch nimmt und das 4-Fache kostet, da einzelne Kernsegmente für die Turbinenschaufeln hergestellt und aufwendig zu einem Kern zusammengesetzt werden müssen.[1]

1 www.voxeljet.de/case-studies/case-studies/3d-druck-spart-bis-zu-75-an-kosten (23.12.2016)

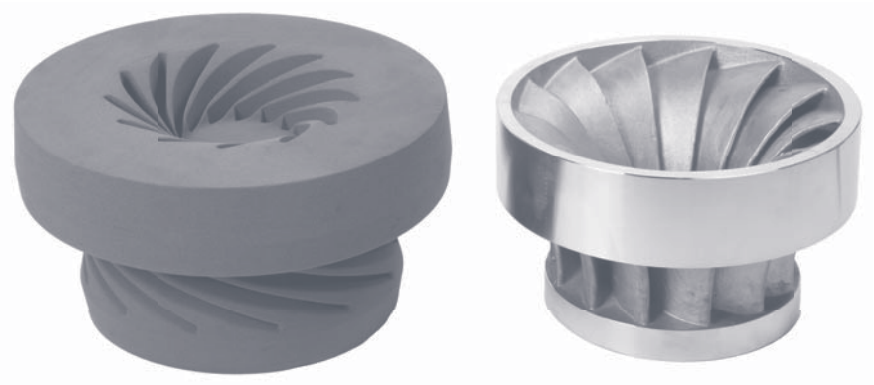
Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abb. II.1 Spritzgießwerkzeugeinsatz mit konturnaher Kühlung



Die Kühlkanäle sind als Negativmodell im Bildhintergrund dargestellt.
Quelle: © RENISHAW GmbH

Abb. II.2 Sandkern (links) für die Herstellung eines Turbinenrads (rechts)



Quelle: © voxeljet AG

Maschinen- und Anlagenbau, Automatisierungstechnik 1.2

Analog zur Situation im Werkzeug- und Formenbau können mit additiven Fertigungsverfahren auch im Maschinen- und Anlagenbau oder in der Automati-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

sierungstechnik Kosten- und Zeitersparnisse realisiert werden, wenn Komponenten in kleinen Stückzahlen und/oder Vorrichtungen für spezielle Aufgaben benötigt werden (z.B. im Sondermaschinenbau). Auch können Apparaturen ausgehend von einer Standardkonstruktion vergleichsweise einfach an die jeweiligen Aufgaben angepasst werden. Bei Anlagen zur Handhabung von Bauteilen mit Vakuumtechnik beispielsweise lassen sich die Saugerpositionen und -winkel optimal passend zum jeweiligen Bauteil konstruieren (VDI 2016, S. 12).

Seit Kurzem und noch in begrenztem Umfang setzt Siemens additive Fertigungsverfahren zur Reparatur von Gasturbinenbrennern ein. Hier wird die verschlissene Spitze vom Brenner abgetrennt und in der additiven Fertigungsanlage neu aufgebaut. Den ersten Erfahrungen nach zu urteilen soll sich damit die Reparaturzeit gegenüber konventionellen Methoden um den Faktor 10 beschleunigen lassen (Navrotsky et al. 2015, S. 51 f.). Künftig dürften Reparaturen von hochwertigen Maschinen- oder Anlagenteilen, die nur partiell verschleißen, daher vermehrt additiv erfolgen.

Luft- und Raumfahrt 1.3

Die Luft- und Raumfahrtindustrie setzt große Hoffnungen in die additive Fertigung und experimentiert bereits seit über zwanzig Jahren damit. Vorrangiges Ziel ist die Herstellung geometrisch komplexer Leichtbauteile, die Gewichtseinsparungen erlauben, im Vergleich zu ihren konventionell gefertigten Pendants aber dieselben Vorgaben hinsichtlich Funktionalität und Festigkeit erfüllen.[2] Die in diesen Branchen typischerweise kleinen Losgrößen (z.B. im Vergleich zur Automobilindustrie) sowie die Möglichkeit, schnell und ortsunabhängig Ersatzteile herstellen zu können, erhöhen die Attraktivität der additiven Fertigung für die Luft- und Raumfahrtindustrie weiter (Bechthold et al. 2015, S. 21).

Luftfahrt

Gleichwohl ist eine auf additiven Fertigungsverfahren basierende industrielle Serienproduktion von Flugzeugbauteilen erst im Entstehen. Als Pionier kann der US-amerikanische Flugzeughersteller Boeing gelten, der bereits rund 300 verschiedene additiv gefertigte Kunststoffbauteile für den Bau seiner Flugzeuge verwendet (bis Anfang 2015 sollen insgesamt über 20.000 solcher Bauteile verbaut worden sein), vorrangig in militärischen Flugzeugtypen, aber beispielswei-

2 Jedes eingesparte Kilogramm an Gewicht verringert über eine angenommene Lebensdauer eines Flugzeugs von 30 Jahren den Kerosinverbrauch um 3.900 bis 5.800 l und damit den Kohlendioxidausstoß um 11 bis 16 t (nach Zahlen aus Huang et al. 2016, S. 9).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

se auch als Komponenten des Luftreinhaltesystems im neuen Passagierflugzeug Boeing 787 Dreamliner (Catalano 2015; Fraunhofer ISI 2016, S. 50). Airbus hat bisher über 2.700 additiv gefertigte Bauteile aus Kunststoff in seine neuen Passagierflugzeuge des Typs A350 XWB eingebaut (Stand April 2016), die seit Ende 2014 ausgeliefert werden.[3] Die bei Boeing und Airbus verwendeten Kunststoffe sind erst seit wenigen Jahren auf dem Markt und für die Nutzung im Innenraum von Flugzeugen zugelassen (Materialise 2015; Stratasys 2015b).

Abb. II.3 Konventionell (oben) und additiv gefertigter (unten) Kabinenhalter für den Airbus A350 XWB

Quelle: © Airbus Operations GmbH

In Bezug auf additiv gefertigte Metallbauteile hat Airbus Medienberichten zufolge bisher rund zwanzig Stück in seine Flugzeuge verbaut, vorwiegend in der Testflotte (Stand Februar 2016; Horch 2016). Dazu gehört etwa der in Abbildung II.3 dargestellte Kabinenhalter aus Titan für das Passagierflugzeug A350 XWB, der durch seine optimierte Form eine Gewichtseinsparung von über 30 % gegenüber konventionell hergestellten Halterungen erreicht (Concept Laser 2016). Im Januar 2016 nahm ein Tochterunternehmen der Airbus Group drei Anlagen für die additive Fertigung von Titanbauteilen in Betrieb und begann mit der Serienproduktion für einen doppelwandigen Rohrkrümmer im Treibstoffsystem des Militärtransporters A400M (Premium Aerotec 2016). 2017 möchte Airbus auch die additive Serienproduktion für Flugzeugkomponenten

3 www.airbus.com/newsevents/news-events-single/detail/innovative-3d-printing-solutions-are-taking-shape-within-airbus (23.12.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

aus Edelstahl und Aluminium etablieren. Langfristiges Ziel ist es, bis zu 10 % der Bauteile, die bisher von Zulieferern bezogen werden, selber additiv herzustellen (Kempkens 2015).

Auch im Triebwerksbereich werden schon erste ausgewählte Komponenten aus additiver Fertigung eingesetzt bzw. getestet. Der deutsche Marktführer im Triebwerksbau MTU Aero Engines stellt seit 2014 additiv gefertigte Boroskopaugen her (Zugangsöffnungen für die Triebwerksinspektion; MTU 2014). Seit 2015 werden in Triebwerken des US-Unternehmens General Electric additiv gefertigte Metallgehäuse für Druck- und Temperatursensoren eingesetzt. CFM International (Joint Venture von General Electric und Snecma, Frankreich) begann 2010 mit der Entwicklung eines neuen Flugzeugtriebwerks namens LEAP, das mit 19 additiv gefertigten Brennstoffdüsen ausgestattet ist. Gegenüber den konventionell hergestellten Brennstoffdüsen sind diese um 25 % leichter, bestehen anstelle von 18 Teilen nur noch aus einem einzigen Bauteil und sollen dank integrierter Kühlkanäle eine 5-mal längere Lebensdauer aufweisen (Kellner 2015).[4] Der erste Airbus A320neo, der mit diesem neuen Triebwerk ausgestattet ist, ist seit Juli 2016 im kommerziellen Einsatz (CFM International 2016).

Da die Erschließung der Potenziale erst ganz am Anfang steht, wird allgemein von einem starken Bedeutungszuwachs der additiven Fertigung in der Luftfahrtindustrie ausgegangen. Die Herausforderungen dürften hier weniger in der Produktion und Wertschöpfung liegen als vielmehr bei der Markteinführung neuer Materialien und Produkte aufgrund der im Luftverkehr üblichen strikten Auflagen bei der Zertifizierung (VDI/VDE-IT 2015, S. 12).

Raumfahrt

Auch die Raumfahrtindustrie prüft derzeit das Leistungsvermögen der additiven Fertigung für ihre Zwecke. Dies umfasst die Identifizierung von Komponenten, deren Herstellung und Funktionalitäten damit optimiert werden könnten, aber auch erste Labortests z.B. mit Raketentriebwerken, die mit additiv gefertigten Brennkammern und Düsen aus Titan ausgestattet sind (ESA 2015a u. 2015b).

Künftig sollen additive Fertigungsanlagen auch eine schnelle Produktion wichtiger Ersatzteile im Weltall ermöglichen, die anderenfalls nur mit großer zeitlicher Verzögerung per Versorgungsflug dorthin gebracht werden können. Um die prinzipielle Funktionsfähigkeit in der Schwerelosigkeit zu überprüfen, testet die NASA seit 2014 eine experimentelle Anlage zur additiven Fertigung von Kunststoffbauteilen auf der internationalen Raumstation ISS. Die Versuche scheinen erfolgreich zu verlaufen, denn die Installation einer permanenten addi-

4 www.geglobalresearch.com/innovation/3d-printing-creates-new-parts-aircraft-engines (23.12.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

tiven Fertigungsanlage auf der ISS ist geplant.[5] Weitergehende Überlegungen gehen dahin, auch künftige Langzeitmissionen (z.B. zum Mars) mit additiven Fertigungsanlagen auszurüsten (VDI/VDE-IT 2015, S. 12 f.). Um den Materialbedarf zu reduzieren, wird zudem an weltalltauglichen Recyclinganlagen gearbeitet, mit denen nicht mehr benötigte Gegenstände wieder in Ausgangsmaterialien für additive Fertigungsprozesse umgewandelt werden können.[6]

Automobilindustrie 1.4

In der Automobilindustrie werden additive Fertigungsverfahren in der Bauteil- und Fahrzeugentwicklung seit über 20 Jahren zur Herstellung von Design- und Funktionsmodellen sowie in der Produktion seit einigen Jahren zur Herstellung von Werkzeugen und Montagehilfen eingesetzt. In Bezug auf einbaufähige Fahrzeugkomponenten gibt es erste Anwendungen bei der Herstellung von Spezialanfertigungen für Luxuswagen (z.B. Bedienungs- oder Dekorelemente für den Fahrzeuginnenbereich) oder im Bereich des Motorsports, wo es typischerweise um Einzelstücke oder Kleinserien geht und die Bauteilkosten von nachrangiger Bedeutung sind. Hier bieten additive Fertigungsverfahren vielfältige Möglichkeiten, die Fahrzeugkomponenten technisch zu optimieren oder nach den Wünschen des Kunden zu gestalten. In Einzelfällen werden auch bereits Ersatzteile additiv gefertigt, z.B. für Oldtimer (VDI/VDE-IT 2015, S. 13).

In Zukunft soll die additive Fertigung verstärkt auch in der Serienproduktion eingesetzt werden, um Fahrzeugkomponenten, Karosserien oder gar vollständige Autos zu fertigen. Solche Ideen sind allerdings noch weit von einer industriellen Anwendung entfernt, da die Integration additiver Fertigungsverfahren in die aufgrund der hier üblichen hohen Losgrößen stark automatisierten Produktion gegenwärtig und auf absehbare Zeit noch nicht möglich ist (Kap. III.6). Entsprechend beschränken sich die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten gegenwärtig auf Design- und Konzeptstudien sowie – in Einzelfällen – auf die additive Fertigung erster Konzeptfahrzeuge zu Demonstrationszwecken (Peters 2015, S. 31 f.; VDI/VDE-IT 2015, S. 13).

Vergleichsweise weit fortgeschritten erscheinen hierbei die Aktivitäten des US-amerikanischen Unternehmens Local Motors, das 2015 den Kleinwagen LM3D Swim präsentierte, dessen Karosserieteile nahezu vollständig additiv gefertigt wurden und aus mit Carbonfasern verstärktem Kunststoff bestehen – Räder, Reifen, Antrieb, Steuerungskomponenten etc. sind allerdings konventioneller Machart. Derzeit bemühen sich die Hersteller um die Straßenzulassung

5 www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/1115.html; www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/2198.html (23.12.2016)
6 www.madeinspace.us/projects/r3do (23.12.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

für den Wagen, wozu u.a. Crashtests durchzuführen sind. Die serielle Produktion und Auslieferung des über 50.000 US-Dollar teuren Autos wurden für das Jahr 2017 angekündigt (Local Motors 2015). Das Fahrzeug ist allerdings äußert einfach in seinem Aufbau, und auch die Verarbeitungsqualität scheint noch mangelhaft (Abb. II.4). Wo hier der über den reinen Neuigkeitswert hinausgehende Nutzen einer additiven gegenüber der konventionellen Fertigung liegt, ist gegenwärtig noch nicht zu erkennen.

Abb. II.4 Computerdarstellung und Detailansicht des LM3D Swim

Quelle: © Local Motors

Einen tatsächlichen Mehrwert könnte die additive Fertigung hingegen für die Realisierung neuartiger Konstruktionsansätze für ausgewählte Komponenten bieten, etwa im Hinblick auf Gewichtsreduktionen bei gleichzeitiger Erhöhung der Fahrzeugleistung und des Insassenschutzes. In diesem Zusammenhang präsentierte 2015 beispielsweise die deutsche EDAG Engineering GmbH (2015) ein mithilfe additiver Fertigungsverfahren produziertes Konzeptfahrzeug, dessen Karosserie aus einer bionisch inspirierten, verästelten Tragstruktur besteht, die aber trotz der Reduktion des Materialeinsatzes allen strukturellen Anforderungen gerecht werden soll. Ein weiteres Anwendungsbeispiel sind additiv gefertigte Wärmetauscher, die gegenüber konventionell hergestellten Produkten durch eine komplexere Geometrie leistungsfähiger, kompakter und leichter wären.[7] Schließlich wird in der Branche der mögliche Nutzen der additiven Fertigung in der Ersatzteilproduktion intensiv diskutiert. Damit ließen sich Ersatzteile nach Bedarf und in Kundennähe (z.B. in der Kfz-Werkstatt) herstellen, wodurch teure Lager- und Logistikkosten entfallen, weil anstelle der Ersatzteile und der

7 www.eos.info/branchen_maerkte/automobil/serienfahrzeuge (23.12.2016)

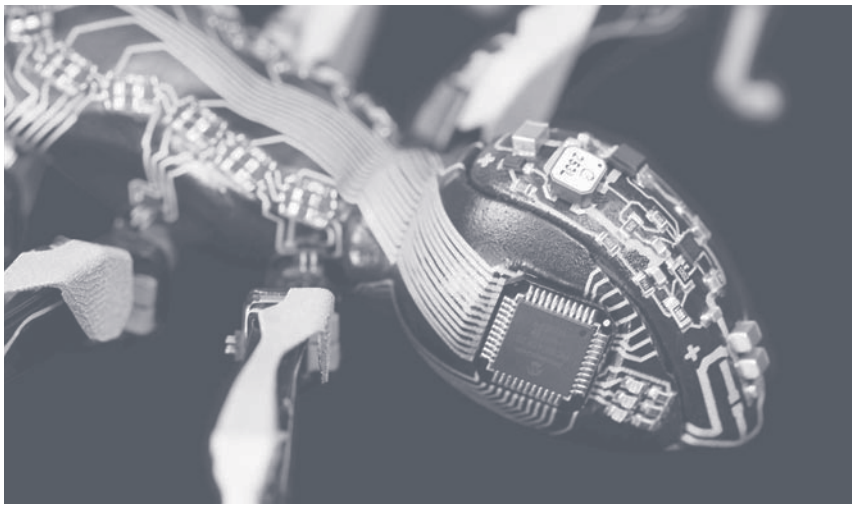
Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Werkzeuge für die Ersatzteilproduktion nur noch die entsprechenden digitalen 3-D-Modelle vorgehalten und vertrieben werden müssten (Peters 2015, S. 33).

Elektronik 1.5

Im Bereich der Elektronik werden verschiedene additive Verfahrenstechniken bereits angewendet bzw. zurzeit entwickelt, mit deren Hilfe sich metallische Leiterbahnen auf dreidimensionale (konventionell oder additiv gefertigte) Kunststoffkörper aufbringen lassen. Zur Anwendung gelangen elektrisch leitfähige Tinten oder im Kunststoffkörper eingebettete Additive, die durch einen Laserstrahl entsprechend den vorgesehenen Leiterbahnen aktiviert und anschließend metallisiert werden (Berger et al. 2013, S. 70 f.). Die Schaltungsträger werden anschließend mit elektronischen bzw. mechatronischen Bauelementen bestückt (Abb. II.5).

Abb. II.5 Additiv aufgebrachte elektrische Leiterbahnen



Quelle: BionicANTs von Festo – hochintegrierte Bauteile – 3-D-MID-Technologie auf lasergesinterten Formteilen © Festo AG & Co. KG

Angewendet werden diese Verfahren u.a. in der Mobilfunk-, Medizin- und Sicherheitstechnik sowie im Automobilbau.[8] Sie weisen allerdings einen starken Bezug zu herkömmlichen 2-D-Drucktechniken auf, da hier im Wesentlichen zwar gebogene, aber dennoch zweidimensionale Oberflächen bedruckt werden und keine dreidimensionalen Körper entstehen.

8 www.festo.com/group/de/cms/10631.htm (23.12.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Die Vision in der Elektronikindustrie besteht vielmehr darin, künftig ganze Bauteile mit integrierter Elektronik in einem einzigen additiven Bauvorgang fertigen zu können. Hierzu müssten neben der Trägerstruktur und den Leiterbahnen zeitgleich auch die (mikro)elektronischen Bauelemente (integrierte Schaltungen, Kondensatoren, Dioden etc.) additiv gefertigt werden, was heute noch nicht möglich ist. Diese Technologie hätte vor allem aufgrund der hohen Geometriefreiheit und der Miniaturisierungsmöglichkeiten ein enormes Potenzial (VDI/VDE-IT 2015, S. 14).

Medizin 1.6

In der Medizintechnik entfaltet sich der Nutzen additiver Fertigungsverfahren insbesondere bei der Herstellung individualisierter Produkte. In einem sehr frühen Forschungsstadium befinden sich Ideen, mithilfe von additiven Prozessen lebendes Gewebe herzustellen.

Dental- und Hörgerätetechnik

In der Dental- und Hörgerätetechnik sind additive Fertigungsverfahren schon heute marktfähig und etabliert (VDI/VDE-IT 2015, S. 14). In der Dentaltechnik lassen sich viele der in der konventionellen Zahnersatzherstellung erforderlichen manuellen Bearbeitungsschritte durch additive Fertigungsverfahren ersetzen. So können auf der Basis eines digitalen 3-D-Modells des Kiefers des Patienten, das beim Zahnarzt mithilfe eines Intraoralscanners oder per Scan einer Abformung erstellt wird, dentaltechnische Modelle aus Kunststoff, Kunststoffmodelle der Zahnkronen oder -brücken für den Feinguss oder direkt auch Kronen und Brücken aus biokompatiblen Metallen additiv gefertigt werden (Abb. II.6).

Jährlich sollen über 10 Mio. Brücken, Kronen und Zahnteile additiv hergestellt werden (Peels 2016). Dass trotz der relativ langsamen Prozessgeschwindigkeit bei der additiven Fertigung eine wirtschaftliche Produktion großer Stückzahlen möglich ist, liegt im kleinen Volumen der Zahnprothesen begründet: Je nach Anlage und Art des Zahnersatzes können in einem Bauvorgang bis zu mehrere Hundert individuelle Erzeugnisse gleichzeitig gefertigt werden.[9] Der gegenüber konventionellen Methoden erzielbare Mehrwert für den Patienten besteht in der besseren Passgenauigkeit und kostengünstigeren Herstellung des Zahnersatzes sowie potenziell in einer kürzeren Behandlungsdauer (Gebhardt et

9 In einer modernen Anlage können beispielsweise innerhalb von 24 Stunden 450 metallische Zahnkronen gleichzeitig hergestellt werden. Dies entspricht einer durchschnittlichen Baugeschwindigkeit von 3 Minuten pro Krone (EOS 2013, S. 6).

al. 2015, S. 49 f.). Weitere individuelle zahntechnische Produkte und Hilfsmittel werden bereits additiv gefertigt, beispielsweise Modellgussprothesen, Bohrschablonen, Schienen oder Abformlöffel (Berger et al. 2013, S. 60 f.; EOS 2013). Generell gilt der Bereich Dentaltechnik als ein Innovationstreiber für die additive Fertigung. Verschiedene Marktforschungsinstitute erwarten hier jährliche Wachstumsraten von über 15 % (Gebhardt et al. 2015, S. 50; VDI/VDE-IT 2015, S. 14 f.).

Abb. II.6 Brücke und dentaltechnisches Modell aus additiver Fertigung

Auf den Backenzähnen links sind die Stützstrukturen aus dem Fertigungsprozesses noch zu erkennen. Auf den Eck- und Schneidezähnen ist die nachbearbeitete Brücke zu sehen, auf den Backenzähnen rechts die mit Keramik verblendete Brücke.

Quelle: EOS GmbH Electro Optical Systems

Abb. II.7 Ohrpassstücke aus additiver Fertigung

Quelle: © EnvisionTEC GmbH

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Bei Hörgeräten wird das Ohrpassstück additiv gefertigt, wozu ein digitales 3-D-Modell des äußeren Gehörgangs durch Laserscan im Ohr oder Einscannen eines Silikonabdruckes erstellt wird (Abb. II.7). Das Verfahren ist hinsichtlich Produktivität und Qualität der konventionellen Herstellung überlegen, sodass 2010 bereits 40 % der Weltproduktion an Ohrpassstücken additiv erfolgte (Berger et al. 2013, S. 64; Mesaric 2010, S. 26 f.). Auch hier ermöglicht die geringe Größe der Erzeugnisse die Herstellung von bis zu 200 individuellen Ohrpassstücken in einem Bauvorgang gleichzeitig (der Bauvorgang dauert rund 10 Stunden; Gebhardt et al. 2015, S. 112).

Prothetik und medizinische Hilfsmittel

In der Prothetik gibt es erste Einsatzfelder für die additive Fertigung, gleichwohl befinden sich diese Anwendungen noch in einer frühen Entwicklungsphase (VDI/VDE-IT 2015, S. 15). Triebfeder ist auch hier das hohe Maß an Gestaltungsfreiheit für die Herstellung individuell angepasster Prothesen. Implantate als Knochenersatz beispielsweise lassen sich in Form und Größe exakt der Patientenanatomie anpassen, durch geeignete Formgebung, wie z. B. Wabenstrukturen, sind Gewichtseinsparungen bei gleichbleibender Stabilität erzielbar, und poröse Strukturen an der Grenzfläche zwischen Knochen und Implantat ermöglichen es dem gesunden Knochengewebe, in das Implantat einzuwachsen, um so eine feste Verbindung zu etablieren (Berger et al. 2013, S. 62).

Seit 2012 implantiert die Klinik für Orthopädie in Dortmund maßgeschneiderte additiv gefertigte Knieprothesen aus Metall (bis April 2015 bereits über 300 Stück). Die ersten Erfahrungen zeigen, dass die Wunden weniger nachbluten, der Heilungsprozess schneller verläuft und die Patienten früher wieder mobil sind im Vergleich zur Behandlung mit Standardprothesen. Additiv gefertigte Knieprothesen sind erst seit 2008 auf dem Markt erhältlich und kosten aktuell rund das Doppelte einer Standardprothese (Lindekamp 2015). Auch additiv gefertigte Cages als Wirbelkörperersatz oder individuelle Hüftprothesen aus Titan werden bereits verwendet (Oberndorfer 2015). Schließlich wurden 2014 und 2015 erstmalig auch aus Titan additiv gefertigte Implantate für Wirbelkörper, das Kreuz- und Brustbein oder Schädelplatten bzw. ganze Schädeldecken aus Kunststoff oder Titan implantiert.[10] Hierbei handelt es sich allerdings um Einzelfälle mit ausgeprägtem Versuchscharakter. Da es bisher generell noch an Langzeitbeobachtungen fehlt, können zurzeit keine Aussagen über die biologische und stoffliche Wirkung sowie die Stabilität additiv gefertigter Implantate im Körper über längere Zeiträume hinweg oder über langfristige Behandlungsergebnisse gemacht werden (Lindekamp 2015; Wang et al. 2016, S. 137).

10 Condemarin 2015a u. 2015b; Doris 2014; Krämer 2014

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Auch die Herstellung maßgeschneiderter Arm-, Hand- oder Beinprothesen soll künftig mit additiven Fertigungsverfahren einfacher und vor allem preisgünstiger möglich sein. Erste Überlegungen gehen dahin, entsprechende digitale 3-D-Modelle als Open Source zur Verfügung zu stellen, um auf deren Grundlage Exoprothesen für nur wenige 100 US-Dollar insbesondere für Patienten in ärmeren Ländern herstellen zu können (VDI/VDE-IT 2015, S. 15).

Von Nutzen sind additive Fertigungsverfahren schließlich für die schnelle und kostengünstige Herstellung von chirurgischen Hilfsmitteln (z. B. patientenspezifische Einweginstrumente wie Bohr- und Sägeschablonen) oder von individuellen anatomischen Modellen für die Diagnostik und Operationsvorbereitung (VDI 2016, S. 14).

Bioprinting

Im Stadium der Grundlagen- und Laborforschung befindet sich das sogenannte Bioprinting. Hierbei wird versucht, mithilfe additiver Verfahrenstechniken dreidimensional strukturiertes künstliches biologisches bzw. biokompatibles Gewebe z. B. für klinische Arzneimitteltests herzustellen. In Zukunft soll damit die synthetische Erzeugung von funktionsfähigen Gewebeteilen oder Organen möglich werden, die als Implantate oder zur medizinischen Forschung dienen. Ein weiteres potenzielles Anwendungsfeld wäre die Herstellung von künstlichem Fleisch in der Nahrungsmittelindustrie (Peters 2015, S. 35).

Beim Bioprinting werden lebende Zellen des herzustellenden Gewebes in vitro kultiviert und mit biokompatiblen Materialien vermengt. Dieses Biomaterial kann anschließend z. B. über mikroskopisch feine Düsen extrudiert oder analog zur Technik in gewöhnlichen Tintenstrahldruckern tropfenförmig punktgenau und schichtweise aufgebracht werden. Diese Zellaggregationen sollen sich durch zelleigene biologische Prozesse und die Zugabe von Wachstumsfaktoren zu funktionsfähigen Geweben bzw. Organen weiterentwickeln (Mandrycky et al. 2016).

Obwohl es mithilfe des Bioprinting bereits möglich ist, einfache Strukturen mit einer Zusammensetzung analog dem natürlichen Gewebe herzustellen, ist es noch ein sehr weiter Weg, bis voll funktionsfähige Gewebe oder gar Organe für eine Transplantation künstlich erzeugt werden können. Die Herausforderungen sind mannigfaltig. Aus technischer Sicht müssen Verfahren entwickelt werden, welche die Herstellung sehr feiner Strukturen mit hoher Geschwindigkeit erlauben, gleichzeitig aber die sehr empfindlichen lebenden Zellen nicht beschädigen. Für die Herstellung komplexer Gewebestrukturen kann es zudem notwendig sein, mehrere Zelltypen gleichzeitig zu verarbeiten. Eine zentrale Herausforderung besteht darin, das natürliche dreidimensionale Mikroumfeld der Zellen im Gewebe künstlich nachzubilden, die sogenannte extrazelluläre Matrix. Diese aus

Zuckermolekülen und Proteinen bestehende Matrix hat essenzielle biologische (z.B. Nährstoffversorgung, Signaltransport), mechanische (z.B. Formgebung und Stabilität, Elastizität) und chemische Funktionen (z.B. Stabilisierung des pH-Werts) und wird im natürlichen Wachstumsprozess von den Zellen selbst gebildet. Für das Bioprinting sind daher biokompatible Materialen zu entwickeln, die sich nicht nur additiv verarbeiten lassen und die Anordnung von Zellen in dreidimensionale Strukturen erlauben. Auch müssen sich die Materialien nach einem je nach Zelltyp unterschiedlichen Zeitpunkt ohne toxische Zersetzungsprodukte wieder abbauen lassen, damit die Zellen die Möglichkeit haben, ihre eigene Mikroumgebung aufzubauen (Murphy/Atala 2014).

Für einfache, eher homogene Gewebe wie Knorpel-, Binde- oder Fettgewebe wird ein Zeithorizont von 5 bis 10 Jahren bis zum klinischen Einsatz für möglich gehalten (Zitat Borchers in Klempert 2015). Deutlich längere Entwicklungszeiten werden dagegen für komplizierte dreidimensionale Strukturen (Poren, Blutgefäße, Nervenbahnen) sowie komplexe Gewebestrukturen und Organe, in die Nervenbahnen und Blutgefäße einschließlich von Kapillargefäßen zu integrieren sind, erwartet.

Architektur und Bauindustrie 1.7

Die Herstellung von Architekturmodellen ist seit ihren Anfängen ein wichtiges Einsatzgebiet der additiven Fertigung. Seit rund 10 Jahren werden Ideen verfolgt, das Verfahrensprinzip auch zur Herstellung von Baustrukturen bzw. von ganzen Gebäuden einzusetzen. Die Vorteile gegenüber konventionellen Bauverfahren sollen in einer höheren Gestaltungsfreiheit und Baugeschwindigkeit, in der Vermeidung von Abfällen sowie in der Verringerung der Baukosten durch Automatisierung liegen (VDI/VDE-IT 2015, S. 15 f.). Technische Herausforderungen bestehen vor allem noch bei der Verarbeitung von für den Bau geeigneten Materialien sowie in der Skalierung der Anlagen auf die erforderliche Größe. Gegenwärtig werden verschiedene verfahrenstechnische Ansätze verfolgt und erste experimentelle Anlagen erprobt (Kap. III.5).

Mit einem Verfahren namens D-Shape (Kap. III.5.1) beispielsweise möchte ein niederländisches Architekturbüro die Bauelemente für ein Gebäude in Form einer liegenden 8 herstellen. Die Fertigstellung des Gebäudes war ursprünglich für das Jahr 2014 angekündigt, der Baubeginn hat sich allerdings bis heute verzögert(Stand Dezember 2016[11]; Alec 2016; VDI/VDE-IT 2015, S. 16). Seit 2014 wird in Amsterdam an einem 3-stöckigen Haus aus additiv gefertigten Elemen-

11 http://landscapehouse.nl (23.12.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

ten gebaut, die aus Kunststoff bestehen.[12] Auf der Basis des Concrete-Printing-Verfahrens entwickelte ein chinesisches Unternehmen eine Anlage, mit welcher es möglich sein soll, in nur 24 Stunden mehrere einfache Häuser bzw. innerhalb von 2 Tagen die Wandelemente für einen 1.100 m^2 großen Rohbau zu fertigen (Schürmann 2015; dazu Kap. III.5.2).

Auch wenn sich mit additiven Fertigungsverfahren bereits einfache Gebäudestrukturen herstellen lassen, handelt es sich hierbei um erste Funktionsmodelle oder Prototypen. Bis zu einer Serienfertigung unter Praxisbedingungen ist es noch ein sehr weiter Weg. Nicht nur sind verfahrenstechnische Entwicklungsfortschritte zu erzielen, ebenso müssen additiv gefertigte Gebäude(teile) die bautechnischen Auflagen (Standsicherheit, Langlebigkeit, Brand-, Schall-, Wärme- und Erschütterungsschutz etc.) erfüllen und letztlich auch bewohnbar sein. Zudem bleibt abzuwarten, ob additive Bauprozesse gegenüber konventionellen Methoden auch ökonomische Vorteile bieten können, was aus heutiger Sicht zumindest im Zweckbau eher unwahrscheinlich erscheint.[13] Von Nutzen könnten sie perspektivisch gegebenenfalls im Bereich von Repräsentationsbauten mit geometrisch komplexen Gestaltungselementen (z.B. aufwendigen Fassadendekorationen) oder beim Häuserbau unter erschwerten Bedingungen sein. In Bezug auf Letzteres wird etwa der Wohnungsbau in Krisengebieten, die schnelle Bereitstellung von Notunterkünften nach Naturkatastrophen oder – als Vision – der Bau einer Mondbasis genannt (VDI/VDE-IT 2015, S. 13 u. 16).

Kreativbranchen 1.8

Für Designer und Kunstschaffende eröffnen additive Fertigungsverfahren ganz neue Möglichkeiten der kreativen Entfaltung bei gleichzeitig steigender Produktivität. Auch lassen sich damit Entwürfe vergleichsweise einfach umsetzen, die mit konventionellen Fertigungsverfahren aufgrund technischer oder wirtschaftlicher Restriktionen (vor allem bei personalisierten Einzelstücken) nur sehr aufwendig bzw. gar nicht realisierbar wären (Berger et al. 2013, S. 56 f.; Peers 2015, S. 40).

In der Schmuck- und Uhrenindustrie werden additiv gefertigte Gussformen eingesetzt, darüber hinaus lassen sich Edelmetalle wie Gold, Platin, Silber oder Edelstahl auch direkt additiv verarbeiten (Doris 2016a; Vogt 2016). Auf Messen und im Handel finden sich auch bei den Einrichtungsgegenständen (Möbel, Lampen etc.) immer öfter Designerstücke, die mit additiv gefertigten Gussfor-

12 http://3dprintcanalhouse.com (23.12.2016)

13 Insofern erscheinen Ankündigung wie jene, dass Dubai bis 2030 ein Viertel seiner Gebäude mit additiven Fertigungsverfahren bauen möchte (Doris 2016b), wenig glaubhaft.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

men oder direkt additiv hergestellt werden. Das Spektrum der einsetzbaren Materialien reicht hier von Metallen über Keramiken bis hin zu Kunststoffen und speziellen Polymermischungen wie Laywood (Mischung aus Holzfasern und einem polymeren Bindemittel), das Holz sehr ähnlich sieht, oder Laybrick (Mischung aus Kalksteinpulver und Bindemittel), mit welchem sich sandsteinähnliche Gegenstände herstellen lassen (Kap. III.2.1). Die Möglichkeiten erweitern sich schließlich durch die Verfügbarkeit von Anlagen mit immer größeren Bauvolumen. So bietet das Berliner Unternehmen BigRep für rund 40.000 Euro eine Anlage mit einem Bauraum der Kantenlänge von über 1 m an, mit welcher sich Stühle, Couchtische etc. in einem Stück fertigen lassen (Schürmann 2016). Es ist davon auszugehen, dass sich additive Fertigungsverfahren im Design- und Kunstbereich weiter verbreiten.

Die Theater-, Film- und Fernsehindustrie nutzt additive Fertigungsverfahren, um realistische Kulissen, Requisiten (Masken, Rüstungen, Waffen etc.), Modellfahrzeuge oder Konzeptmodelle schnell und kostengünstig herzustellen. Für den James-Bond-Film »Skyfall« etwa erstellte die bayerische Firma Voxeljet drei Modelle des Aston-Martin-Sportwagens (VDI/VDE-IT 2015, S. 18).

Bekleidungs- und Sportartikelindustrie 1.9

In der Bekleidungsindustrie beschränken sich die Einsatzmöglichkeiten der additiven Fertigung vorrangig noch auf experimentelle und künstlerische Anwendungen (VDI/VDE-IT 2015, S. 18). Mit Blick auf praktischere Anwendungen wird derzeit an neuen Verfahren und Materialentwicklungen für die Textilindustrie geforscht. Das britische Unternehmen Tamicare etwa experimentiert seit 2001 mit Mischungen aus flüssigen Polymeren (Latex, Silikon, Polyurethane, Teflon) und Textilfasern (Baumwolle, Viskose oder Polyamid), die schichtweise auf eine Bauplattform aufgesprüht werden. Eine erste Entwicklung ist ein atmungsaktives Gewebe aus Latex und Baumwollfasern (Handelsname Cosyflex), das dehnbar und biologisch abbaubar ist und sich z.B. für die Produktion von Einwegunterwäsche eignen soll (VDI/VDE-IT 2015, S. 19). Die erste industrielle Produktionslinie für Cosyflex ging Ende 2015 in Betrieb (Scott 2015). Mit ähnlichen Verfahren wollen weitere Start-up-Unternehmen in Zukunft eine individuelle Kleiderproduktion anbieten, der Weg dahin dürfte aber noch weit sein.[14]

Die Schuhindustrie experimentiert seit 2011 mit additiven Fertigungsverfahren mit dem Ziel, für jeden Fuß und jede Anwendung passgenaue Schuhe herzustellen. Große Sportartikelhersteller rüsten bereits Athleten mit Schuhen

14 So hat etwa das 2014 gegründete Start-up-Unternehmen Electroloom (USA) seine Aktivitäten bereits wieder einstellen müssen (www.electroloom.com [23.12.2016]).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

aus, deren additiv gefertigte Laufsohlen optimal an die Bedürfnisse der Sportler (in Bezug auf Form, Gewicht, Dämpfung etc.) angepasst sind (Krämer 2016a). Erste Start-up-Unternehmen möchten künftig maßgeschneiderte Schuhe für jedermann anbieten, die auf Grundlage eines 3-D-Scans der Füße des Kunden additiv gefertigt werden sollen.[15] Es bleibt abzuwarten, ob solche Geschäftsmodelle sich erfolgreich umsetzen lassen.

Weitere Beispiele für Sportgeräte, die bereits mithilfe additiver Fertigungsverfahren hergestellt wurden bzw. werden, sind Fahrradrahmen, Golfschläger, Surfbretter, Hufeisen, Skibindungen und -schlitten, Helme oder Protektoren (VDI/VDE-IT 2015, S. 19). Allerdings handelt es sich hierbei in den meisten Fällen noch um Prototypen oder erste Funktionsmodelle von Start-up-Unternehmen oder Forschungsinstituten. Eine breite Anwendung additiver Fertigungsverfahren in der Sportgeräteindustrie findet derzeit noch nicht statt.

Spielwarenindustrie 1.10

Für die Spielwarenindustrie bieten additive Fertigungsverfahren vielfältige Möglichkeiten für neue Geschäfts- und Vertriebsmodelle sowie die Herstellung individueller und/oder vom Kunden mitgestalteter Spielwaren. So bieten bereits zahlreiche Unternehmen die Möglichkeit, auf der Basis eines 3-D-Scans eine additiv gefertigte Miniatur der eigenen Person herstellen zu lassen. Eine 15 cm hohe Figur kostet zurzeit rund 200 Euro (VDI/VDE-IT 2015, S. 17). Führende Spielwarenanbieter sind in den vergangenen Jahren Partnerschaften mit Dienstleistern im Bereich der additiven Fertigung eingegangen und bieten beispielsweise in Spielwarengeschäften Kindern die Möglichkeit, ihr eigenes Spielzeug am Computer mitzugestalten und vor Ort additiv herstellen zu lassen (Leupold/Glossner 2016, S. 17). Andere Anbieter stellen Onlineplattformen zur Verfügung, auf welchen Kunden die Spielwaren aus vorgegebenen Komponenten individuell zusammenstellen und farblich gestalten können. Anschließend wird das Spielzeug additiv gefertigt und dem Kunden zugeschickt.[16] Wieder andere Spielwarenhändler bieten Geräte für die additive Fertigung an, die selbst von Kindern bedient werden können (z. B. Krämer 2016d). Es ist davon auszugehen, dass die Möglichkeiten der additiven Fertigung in der Spielwarenindustrie künftig immer stärker genutzt werden.

15 beispielsweise Pensar in den USA (http://pensardevelopment.com/projects/dna-shoe-concept [23.12.2016])

16 beispielsweise www.imaginarium.de/imaginieer.htm (23.12.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Nahrungsmittelindustrie 1.11

Bestimmte Nahrungsmittel weisen Stoffeigenschaften auf, durch welche sie sich für eine Verarbeitung nach additiven Verfahrensprinzipen eignen. Pastöse Nahrungsmittel (Teige, Pürees, Marzipan etc.) oder gekochte Gerichte, die püriert und mit Texturgebern zu einer pastösen Konsistenz angedickt werden (z.B. Gemüse oder Fleisch), können über eine computergesteuerte Düse extrudiert werden. Schmelzbare Lebensmittel wie Schokolade können ähnlich wie Kunststoffe im Schmelzschichtverfahren (Kap. III.2.1) bearbeitet werden. Pulverförmige Lebensmittel (Zucker, Mehl etc.) lassen sich mit flüssigen Bindern (z.B. Wasser) verkleben und so schichtweise zu filigranen Figuren formen (Kap III.2.3).

Erste Geräte für die additive Lebensmittelverarbeitung stehen bereits zur Verfügung oder sind angekündigt. Beispielsweise wird seit 2016 der in Deutschland vom Start-up-Unternehmen Print2taste in Zusammenarbeit mit der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT) entwickelte Bocusini für rund 3.000 Euro angeboten, mit welchem sich pastöse Lebensmittel verarbeiten lassen.[17] Für rund 1.900 Euro soll demnächst der in Spanien entwickelte Foodini in den Handel kommen, mit welchem sich Gebäckwaren, Schokoladenskulpturen, Pizzaböden mit Tomatensauce (der Belag muss allerdings von Hand aufgebracht werden) oder etwa Maiskolben drucken lassen (Abb. II.8).[18] Der ChefJet aus den USA erzeugt aus pulverförmigen Zucker und eingefärbtem Bindemittel farbige Skulpturen (Abb. II.8) mit einem maximalen Volumen von 25 x 35 x 20 cm und soll in der Basisvariante rund 3.600 Euro kosten (Peters 2015, S. 43).

Aufgrund der (noch) hohen Geräteanschaffungskosten richten sich diese Angebote vorrangig an die gehobene Gastronomie, Bäckereien, Konditoreien etc. sowie gegebenenfalls an ambitionierte Hobbyköche. Damit sich aber das in den Medien häufig gezeichnete Zukunftsbild verwirklichen lässt, wonach künftig in jedem privaten Haushalt ein solches Gerät stehen soll, müsste die Technik nicht nur schneller, preiswerter und einfacher in der Handhabung werden, sondern auch einen praktischen Nutzen im Alltag aufweisen, der zurzeit (neben dem Unterhaltungswert) noch nicht zu erkennen ist.

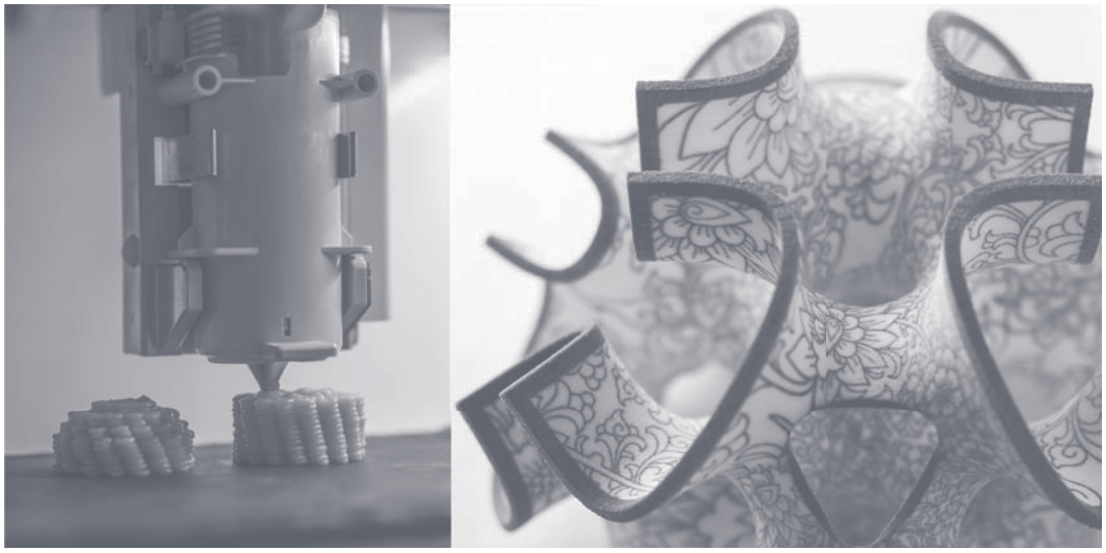
Gegebenenfalls von Nutzen könnte die Technik hingegen in speziellen Anwendungsbereichen sein. In der Alten- und Krankenpflege beispielsweise werden bisher für Personen mit Kau- oder Schluckbeschwerden die Bestandteile herkömmlich gekochter Gerichte püriert, angedickt und in Handarbeit mithilfe von Hohlformen wieder in Gestalt gebracht. Durch die additive Lebensmittelverarbeitung könnte dies künftig maschinell erfolgen. Auch ließen sich die Mahlzeiten nach den individuellen Vorlieben und Bedürfnissen der Patienten

17 www.print2taste.de/de/online-shop (23.12.2016)
18 www.naturalmachines.com/faq (23.12.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

zusammensetzen, etwa bei Mangelernährung mit Nährstoffen wie Mineralstoffen, Vitaminen, Proteinen oder Fett anreichern oder bei Unverträglichkeiten ohne bestimmte Bestandteile zubereiten (Heumer 2013). Schließlich investiert auch die NASA mit Blick auf künftige Langzeitmissionen (Flüge zum Mars etc.) seit 2013 in die Forschung in diesem Feld (VDI/VDE-IT 2015, S. 20).

Abb. II.8 Maiskolben aus dem Foodini (links)
Zuckerskulptur aus dem ChefJet (rechts)



Quellen: © Natural Machines (links); © Image courtesy of 3D Systems, Inc. (rechts)

Wissenschaft und Ausbildung 1.12

Als Hilfsmittel finden additive Fertigungsverfahren in verschiedenen Wissenschaftsbereichen bereits Anwendung. In der Paläontologie beispielsweise können Dinosaurierknochen nachgebildet werden, ohne sie vorher aus dem Gestein freilegen zu müssen. Dazu wird eine Computertomografie der Knochen im Boden angefertigt, woraus ein digitales 3-D-Modell und schließlich die additiv gefertigte Knochenkopie erstellt werden (VDI/VDE-IT 2015, S. 22). In der Kunstwissenschaft und Archäologie werden damit Artefakte (Statuen, Reliefs etc.) nachgebildet. So werden zurzeit auf der Basis Tausender Fotografien von Besuchern des inzwischen durch den sogenannten Islamischen Staat zerstörten irakischen Mosul-Museums digitale 3-D-Modelle der zerstörten Artefakte erstellt, mit denen bei Bedarf Replikate additiv gefertigt werden können.[19]

19 https://rekrei.org (23.12.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Für die Ausbildung von Medizinstudenten lassen sich mittels additiver Fertigungsverfahren beispielsweise transparente Körpermodelle herstellen, welche die unterschiedliche Haptik von Gewebe und Organen lebensecht simulieren (Abb. III.5 in Kap. III.2.3).

Rüstungsindustrie und Streitkräfte 1.13

Laut einer Studie des Planungsamtes der Bundeswehr (Vergin et al. 2013) sind u.a. die Streitkräfte der USA aktiv mit der Erforschung möglicher Einsatzgebiete der additiven Fertigung im militärischen Bereich befasst. Die in eigenen Programmen oder in Zusammenarbeit mit Universitäten und Forschungsinstituten betriebenen Projekte umfassen u.a. (VDI/VDE-IT 2015, S. 20 f.; Vergin et al. 2013, S. 8):

- die Entwicklung und Erprobung von mobilen additiven Fertigungsanlagen, um im Feld oder auf Schiffen eine schnelle, preiswerte und vom Nachschub unabhängige Herstellung von Ersatzteilen und Werkzeugen zu ermöglichen (zwei mobile Anlagen werden in Afghanistan erprobt);
- die Entwicklung optimierter Bauteile für Fluggeräte und -körper, Satelliten, Schiffe oder Waffen (z.B. Leichtbaukomponenten, Bauteile mit verbesserten Flugeigenschaften für Flugzeuge und Raketen, kompaktere Sprengköpfe);
- die Herstellung individualisierter Schutzausrüstungen (z.B. Uniformen, Helme, Schutzmasken), die den Tragekomfort und die Sicherheit verbessern sollen;
- die Herstellung dreidimensionaler Geländemodelle zur Unterstützung militärischer und ziviler Operationen.

Erste additiv gefertigte Bauteile sollen bereits in Lenk- und Interkontinentalraketen, Drohnen und Kampfjets verbaut und erfolgreich getestet worden sein (Fey 2016, S. 21). Auch in der NATO wurden laut Vergin et al. (2013, S. 8 f.) ab 2006 verschiedene Studien zum Leistungsvermögen der additiven Fertigung für die Produktion und Reparatur von Bauteilen für die Luft- und Raumfahrt durchgeführt, aus denen insgesamt ein positives Fazit zur Eignung additiver Fertigungsverfahren für militärische Zwecke gezogen wurde.

In der Bundeswehr befasst sich u.a. das Wehrwissenschaftliche Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB) mit der Bewertung des Nutzungspotenzials der additiven Fertigung. In Kooperation mit der EADS (heute Airbus Group) wurde beispielsweise untersucht, ob additiv gefertigte und mit integrierten Kühlkanälen ausgestattete Großkaliberrohrwaffen den Belastungen bei der Schussabgabe standhalten können. Die Versuche scheiterten allerdings an einer zu geringen Härte der Stahlstäbe. Es sollen Folgeuntersuchungen mit neuen

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Werkstoffen und Lösungsansätzen stattfinden. Andere Organisationseinheiten, z.B. das Zentrum für Verifikationsaufgaben der Bundeswehr oder die Universität der Bundeswehr, beschäftigen sich mit den Auswirkungen der additiven Fertigung auf militärische Abläufe oder mit der Herstellung dreidimensionaler Stadtmodelle als Unterstützung für die Einsatzplanung in Krisensituationen (Krämer 2015; Vergin et al. 2013, S. 9).

Auch Streitkräfte von Staaten, die nicht Mitglieder der NATO sind, interessieren sich für militärische Anwendungen der additiven Fertigung. Das chinesische Militär beispielsweise soll damit verschiedene Komponenten für den neuen Kampfjet J-25 (Ghost Bird) produziert haben (Krassenstein 2014) und testet den Einsatz mobiler additiver Fertigungsanlagen im Feld. Die russische Rüstungsindustrie nutzt die Technologien in der Panzerproduktion zur Herstellung von Prototypen aus Titan. Die additive Fertigung soll künftig serienmäßig zur Herstellung von Panzerteilen eingesetzt werden (Fey 2016, S. 22).

In Militärzeitschriften wird die additive Fertigung als eine wichtige technische Ergänzung für die Streitkräfte mit beträchtlichem Potenzial beschrieben. Gleichzeitig wird aber auch vor zu hohen Erwartungen gewarnt. So wäre etwa eine flächendeckende Versorgung von Militärbasen oder Kriegsschiffen mit mobilen additiven Fertigungsanlagen zwar wünschenswert, dürfte aber frühestens in 20 Jahren in greifbare Nähe rücken (VDI/VDE-IT 2015, S. 21).

Anwendungen im privaten Bereich 2.

Seit der Entwicklung der ersten additiven Fertigungsverfahren vor über 30 Jahren werden neben leistungsstarken Fertigungsanlagen für industrielle oder gewerbliche Kunden auch einfachere und kostengünstigere Geräte für Endverbraucher angeboten, sogenannte Desktop-3-D-Drucker (im Folgenden 3-D-Drucker). Gleichwohl blieben die Anschaffungskosten für 3-D-Drucker lange Zeit so hoch, dass sich nicht mehr als ein sehr kleiner Nischenmarkt entwickeln konnte. Insbesondere das Auslaufen der ersten Patente für additive Fertigungsverfahren ab 2009[20] und das dadurch befeuerte Open-Source-Projekt »RepRap« (Replicating Rapid-prototyper) haben zu massiven Preissenkungen bei 3-D-Druckern und Softwarelösungen für den Endverbraucher geführt (Bechthold et al. 2015, S. 37). Die zunächst von der Makerbewegung vereinnahmte und von dieser weiterentwickelte Technik zieht seitdem immer stärker das Interesse der Medien auf sich und gewinnt zunehmend an Popularität auch bei weniger technikaffinen Nutzern sowie in Schulen oder Universitäten. Heute bedienen Dut-

20 unter anderem Patent US 5121329 A: Apparatus and method for creating three-dimensional objects (www.google.com/patents/US5121329?hl=de&dq=5121329 [23.12.2016])

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

zende von kommerziellen Anbietern den Markt für 3-D-Drucker, Druckmaterialien und Software, welcher sich, gemessen an den verkauften Geräten, ausgehend von über 200.000 im Jahr 2015 jährlich verdoppeln soll (Gartner 2015).

3-D-Drucker und die Makerbewegung 2.1

Ein zentraler Treiber für die Verbreitung und Weiterentwicklung von 3-D-Druckern für Privatanwender war und ist die Makerbewegung. Diese speist sich aus Hobbybastlern, Tüftlern, Do-it-yourself-Enthusiasten oder Hackern, denen das Bedürfnis gemeinsam ist, mit eigenen Mitteln Neues und Individuelles jenseits der etablierten industriellen Massenware zu schaffen. Zentral hierbei sind Vernetzung, Austausch und der Open-Source-Gedanke: Über das Internet werden Ideen, Designs, Bauanleitungen und Erfahrungen öffentlich geteilt, diskutiert und gemeinschaftlich weiterentwickelt. 3-D-Drucker stellen zwar nur eine Facette der Makerbewegung dar, erfüllen aber deren Bedürfnisse in nahezu idealer Weise. Sie bieten einen niedrigschwelligen und preiswerten Zugang zu leistungsfähigen Produktionstechnologien, erlauben aufgrund des weitgehend digitalen Fertigungsprozesses einen einfachen Austausch von Ideen und Bauanleitungen über das Internet und nähren insgesamt die Vision einer universellen Maschine, mit der jeder nach Belieben materielle Objekte herstellen kann (Petschow et al. 2014, S. 20 f.).

Folgerichtig wurde die Technik des 3-D-Drucks von der Makerbewegung früh aufgegriffen und weiterentwickelt. Bezeichnend hierfür steht das 2005 gegründete Open-Source-Projekt »RepRap«, in dessen Rahmen kostenlose Bauanleitungen und Software für 3-D-Drucker entwickelt und im Internet verbreitet wurden und immer noch werden,[21] mit dem Ziel, eine möglichst rasche und weite Verteilung der Technik zu erreichen. Das Besondere an 3-D-Druckern der RepRap-Reihe ist, dass diese sich in Teilen selbst reproduzieren können. Dazu bestehen sie soweit möglich aus Kunststoffbauteilen, die mit den 3-D-Druckern hergestellt werden können. Die dadurch sehr preiswerten Geräte wurden von Makern vielfach nachgebaut und kontinuierlich verbessert und haben so wesentlich zur Bekanntheit und Verbreitung von 3-D-Druckern beigetragen. Schließlich sind aus dem RepRap-Projekt einige der heute führenden kommerziellen Anbieter von 3-D-Druckern hervorgegangen (z.B. MakerBot, Ultimaker).

21 http://reprap.org (23.12.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Kosten und Leistungsvermögen aktueller 3-D-Drucker 2.2

Derzeit liegen die Anschaffungskosten für 3-D-Drucker zwischen wenigen hundert Euro für sehr einfache, teilweise als Bausatz erhältliche Geräte und 2.000 bis 5.000 Euro für höherwertige 3-D-Drucker. Zu den bekannteren Herstellern gehört beispielsweise das Unternehmen MakerBot, dessen neuestes Modell Replicator+ für rund 2.700 Euro im Handel erhältlich ist (Abb. II.9 links). Dieser kann Kunststoffgegenstände aus PLA mit einer maximalen Größe von 30 x 20 x 17 cm fertigen, wobei das Rohmaterial in verschiedenen Farben von MakerBot (für 50 Euro/kg und mehr) oder von Drittanbietern (für rund 25 Euro/kg) verwendet werden kann.[22]

Heute verfügbare 3-D-Drucker basieren ganz überwiegend auf dem in Bezug auf die Verfahrenstechnik und Handhabung vergleichsweise einfachen Schmelzschichtverfahren zur Verarbeitung von Kunststoffen (FDM-Verfahren, Kap. III.2.1). Seit Kurzem werden erste 3-D-Drucker angeboten, die mit anderen kunststoffbasierten Verfahren arbeiten (Stereolithografie und selektives Lasersintern, Kap. III.2.2 u. III.2.4).[23] Weitere kunststoffbasierte additive Fertigungsverfahren oder die Verarbeitung anderer Materialien (Metalle, Keramiken) bleiben aufgrund der anspruchsvollen und kostenintensiven Verfahrenstechniken bis auf Weiteres dem (semi)professionellen Bereich vorbehalten (beispielsweise haben Metalle im Vergleich zu Kunststoffen einen viel höheren Schmelzpunkt, weswegen teure Hochleistungslaser eingesetzt werden müssen, Kap. III.3).

Die steigende Nachfrage nach 3-D-Druckern und der damit einhergehende Wettbewerb zwischen den Herstellern führen dazu, dass die angebotenen Geräte mit jeder Generation in Bezug auf die Anwendung einfacher und auf die Druckqualität und Materialeigenschaften leistungsfähiger werden. Gleichwohl handelt es sich nicht um einfache Plug-and-play-Lösungen, die auf Knopfdruck alle möglichen Gegenstände automatisch herstellen können. Die Bedienung eines 3-D-Druckers ist nach wie vor stark durch Experimentier- und Konfigurationsarbeit geprägt (Suche nach optimalen Druckparametern je nach Druckermodell und Objekt, Säuberung verstopfter Düsen etc.), und bei komplexeren Geometrien sind Fehldrucke keine Seltenheit (z. B. Hultgren 2014; VDI/VDE-IT 2015, S. 32). Auch sind Produkte aus dem 3-D-Drucker in Bezug auf Qualität, Präzision und Materialeigenschaften keinesfalls mit Erzeugnissen aus industriellen additiven Fertigungsanlagen gleichzusetzen. Die Abbildung II.9 (rechts) zeigt zum Vergleich eine auf dem Schmelzschichtverfahren basierende industri-

22 beispielsweise www.grubster.de/3d-drucker (23.12.2016)

23 Geräte für die Stereolithografie kosten 2.000 Euro und mehr, flüssiges Ausgangsmaterial über 160 Euro/l (www.grubster.de/3d-drucker, 23.12.2016). 3-D-Drucker für selektives Lasersintern kosten rund 5.000 Euro (Steck 2015).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

elle Anlage. Die über 180.000 US-Dollar teure Anlage verfügt nicht nur über einen größeren Bauraum (40 x 35 x 40 cm), eine hochpräzise Mechanik und professionelle Bedienungsmöglichkeiten, sondern ermöglicht auch die Verarbeitung diverser (Hochleistungs-)Thermoplaste, wodurch Bauteile je nach Anwendungszweck mit spezifischen Materialeigenschaften ausgestattet werden können (z.B. hohe Zugfestigkeit, Temperatur- oder chemischer Beständigkeit) (Wheeler 2015).

Abb. II.9 3-D-Drucker MakerBot Replicator+ (links) versus industrielle Anlage Fortus 450mc (rechts)

Quellen: © MakerBot (links); © freepik.com (Mitte); © Stratasys Ltd. (rechts)

Entwicklungen im Umfeld des privaten 3-D-Drucks 2.3

Zubehör für den privaten 3-D-Druck

Die zur Fertigung der gewünschten Objekte benötigten digitalen 3-D-Modelle können private Anwender mit einer Computer-Aided-Design-Software (CAD-Software) am Computer selber erstellen oder alternativ mithilfe eines 3-D-Scanners gewinnen, indem ein existierendes Objekt digitalisiert wird. Beide Varianten waren lange Zeit infolge der teuren und komplexen Software bzw. Gerätetechnik für Privatpersonen kaum umzusetzen, mittlerweile existiert jedoch ein breites Angebot sowohl an frei verfügbarer und vergleichsweise einfach zu bedienender CAD-Software als auch an preiswerten 3-D-Scannern (VDI 2014, S. 13). Beispielsweise gibt es bereits erste Apps, mit welcher sich Smartphones als (einfache) 3-D-Scanner verwenden lassen (Condemarin 2015c). Dennoch erfordert die Erstellung geeigneter 3-D-Modelle einiges an technischem Geschick

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

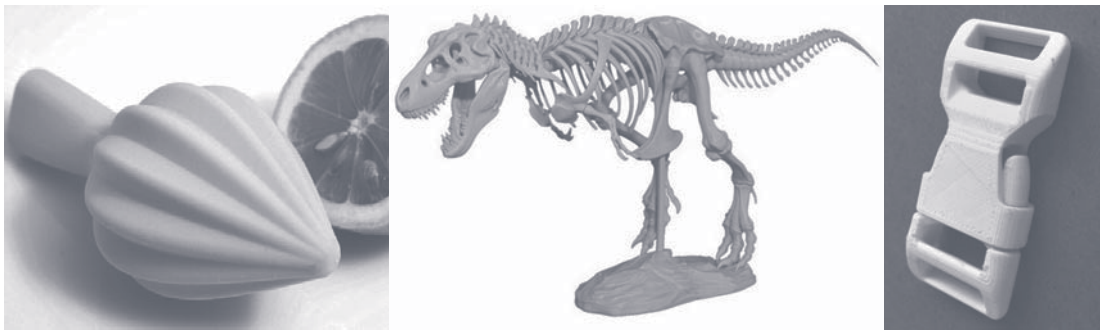
und Know-how, weswegen viele Anwender von 3-D-Druckern die erforderlichen 3-D-Modelle lieber über entsprechende Onlineplattformen beziehen.

Onlineplattformen für digitale 3-D-Modelle

Dem Leitgedanken des Teilens folgend sind aus der Makerbewegung heraus verschiedene Onlineplattformen entstanden, auf denen Nutzer ihre als Open Source lizensierten digitalen 3-D-Modelle hochladen können, um sie mit anderen auszutauschen und/oder gemeinsam weiterzuentwickeln. Eine der größten dieser Art ist die 2008 gegründete Onlineplattform Thingiverse,[24] auf der mittlerweile rund 700.000 3-D-Modelle verschiedenster Objekte zu finden sind, die (meist unter einer Creative-Commons-Lizenz) frei heruntergeladen und genutzt werden können. Das bereitgestellte Spektrum an Objekten reicht von Wohn- und Modeaccessoires, Spielzeug über Kunstobjekte bis hin zu Werkzeug, Computerhardware oder Unterrichtsmaterialien in einer mittlerweile unüberschaubaren Vielfalt (einige Beispiele zeigt die Abb. II.10).

Über solche Onlineplattformen werden zuweilen auch 3-D-Modelle von urheberrechtlich geschützten Gegenständen ohne Zustimmung der Rechteinhaber verbreitet (Kap. VI.1).

Abb. II.10 Gegenstände aus 3-D-Modellen von der Onlineplattform Thingiverse



»Citrus Juicer« vom Thingiversenutzer walter; »T-Rex Skeleton« vom Thingiversenutzer MakerBot; »Side Release Buckle 3/4 inch« vom Thingiversenutzer Universe OfDesign

Quellen: www.thingiverse.com/thing:44328 (CC BY-SA); www.thingiverse.com/thing:275091 (CC BY-NC-SA); www.thingiverse.com/thing:1074129 (CC BY)

24 www.thingiverse.com; weitere Plattformen sind z.B. https://grabcad.com oder www.123dapp.com (23.12.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

FabLabs

Mit dem Aufkommen der Makerbewegung verknüpft ist das Entstehen von Makerspaces oder FabLabs. Hierbei handelt es sich um offene Werkstätten, die Makern als Treffpunkte und Orte des Wissensaustauschs und gemeinschaftlicher Arbeit dienen. Die Werkstätten sind dafür mit verschiedenen Produktionstechnologien und Werkzeugen ausgestattet, neben konventionellen Computerized-Numerical-Control-Fräsen (CNC-Fräsen), Lasercuttern etc. auch mit einfacheren und höherwertigen 3-D-Druckern (teilweise auch mit semiprofessionellen additiven Fertigungsanlagen), 3-D-Scannern und Software. FabLabs stehen aber nicht nur Personen aus der Makerbewegung offen, sondern bieten allen interessierten Personen einen Zugang zu Produktionstechnologien und technologischem Wissen, etwa wenn Gegenstände auf der Grundlage mitgebrachter Baupläne gefertigt werden sollen. Ebenso werden regelmäßig Workshops und Kurse angeboten. Finanziert werden solche Werkstätten über Mitgliederbeiträge, individuelle Beitragssysteme oder öffentliche bzw. private Zuwendungen (Gebhardt et al. 2015, S. 54 ff.).

Das erste FabLab in Deutschland wurde 2009 von der RWTH Aachen eingerichtet,[25] mittlerweile gibt es – meist in gemeinnütziger bzw. kommunaler Trägerschaft oder in Zusammenarbeit mit Hochschulen – in jeder größeren Stadt entsprechende Werkstätten (Gebhardt et al. 2015, S. 54).[26] Es ist davon auszugehen, dass sich die Bekanntheit solcher Einrichtungen stetig erhöht und zur weiteren Bekanntheit und Verbreitung der Technik im privaten Bereich beiträgt (VDI/VDE-IT 2015, S. 32).

Kommerzialisierung des privaten 3-D-Drucks

Die steigende Popularität hat die Technik des 3-D-Drucks längst über die Makerbewegung hinaus bekanntgemacht und zu einer wachsenden Kommerzialisierung von digitalen 3-D-Modellen sowie von Gerätetechnik und Druckzubehör geführt.

Parallel zu den Open-Source-Plattformen der Makerbewegung sind diverse Onlinemarktplätze entstanden, von denen Nutzer die bereitgestellten digitalen 3-D-Modelle gegen Bezahlung herunterladen können.[27] Auch gibt es Onlineplattformen, auf denen Produktdesigner ihre Leistungen anbieten und im Auf-

25 http://hci.rwth-aachen.de/fablab (23.12.2016)

26 Fab Lab Berlin (https://fablab.berlin), FabLabDresden (http://fablabdd.de), Fabulous St. Pauli (www.fablab-hamburg.org), FabLab Darmstadt (www.fabbing-founding.org) (23.12.2016)

27 beispielsweise www.cgtrader.com/3d-print-models, www.turbosquid.com, teilweise https://pinshape.com (23.12.2016)

trag ihrer Kunden digitale 3-D-Modelle der gewünschten Objekte erstellen.[28] Viele dieser kommerziell ausgerichteten Onlineplattformen bieten zudem an, dass die Objekte gleich auf professionellen additiven Fertigungsanlagen hergestellt und dem Kunden zugeschickt werden.

Auch was die Hardware angeht, bieten Elektronikfachmärkte heute ein breites Sortiment an 3-D-Druckern, von Einsteigermodellen bis zu höherwertigen Geräten, sowie das entsprechende Zubehör (Ausgangsmaterialen, 3-D-Scanner, Software). Darüber hinaus wächst die Zahl an Fachgeschäften für 3-D-Drucker stetig an, in denen sich interessierte Personen auch beraten lassen und die Geräte testen können. Das Geschäftsmodell von 3-D-Druckerstores umfasst darüber hinaus das Fertigen von Gegenständen nach Auftrag, Schulungen, Workshops und zum Teil auch gastronomische Angebote.[29] Ob sich solche Geschäftskonzepte durchsetzen und kontinuierlich weiterentwickeln können, kann noch nicht abgeschätzt werden. Hierbei könnte es sich gegebenenfalls auch um ein Hypephänomen handeln, welches sich wieder abschwächt mit der Folge, dass sich der private 3-D-Druck wieder stärker auf die Makerbewegung zurückzieht (Gebhardt et al. 2015, S. 58 f.).

3. Fazit

Im industriellen und gewerblichen Bereich werden additive Fertigungsverfahren seit über 30 Jahren erfolgreich für die Herstellung von Prototypen und Anschauungsmodellen (Rapid Prototyping) sowie seit über 25 Jahren für die Herstellung von Werkzeugen und Gussformen (Rapid Tooling) eingesetzt. Die industrielle Herstellung von einbaufähigen bzw. für den Verbraucher bestimmten Endprodukten mit additiven Fertigungsverfahren (Rapid Manufacturing) hingegen ist bisher nur in sehr wenigen Branchen etabliert. Zwischen den drei Einsatzgebieten der additiven Fertigung – Prototyping, Tooling und Manufacturing – ist daher zu unterscheiden, da anderenfalls der Reifegrad der additiven Fertigung zur Herstellung von Endprodukten überschätzt wird.

Vorreiterbranchen bei der Nutzung additiver Fertigungsverfahren zur Herstellung von Endprodukten sind die Hörgeräte- und Dentalindustrie. Hier werden seit über 10 Jahren individuelle Ohrpassstücke und Zahnprothesen additiv gefertigt, die mittlerweile hohe Marktanteile erzielen. Von Vorteil ist hier, dass durch ihre geringe Größe eine große Zahl (je nach Anlage bis zu mehreren Hundert) an Zahnprothesen bzw. Ohrpassstücken in einem Bauvorgang gleichzeitig gefertigt werden kann, wodurch eine rentable Produktion größerer Stück-

28 beispielsweise http://i.materialise.com, www.trinckle.com (23.12.2016)
29 beispielsweise https://dimensionalley.com, www.igo3d.com/de/igo3d-hamburg, http://fabcafe.com/toulouse (23.12.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

zahlen trotz der relativ langsamen Prozessgeschwindigkeiten bei der additiven Fertigung möglich ist.

In anderen Branchen bzw. Anwendungsfeldern sind die Marktanteile additiv gefertigter Endprodukte hingegen noch gering. Marktfähige Anwendungen gibt es im Bereich der Einzel- und Kleinserienfertigung von Bauteilen mit verbesserten Eigenschaften im Maschinen- und Anlagenbau (einschließlich deren Reparatur), in der Luftfahrt und in der Automobilindustrie, für die Herstellung von individuellen Prothesen, Implantaten und medizinischen Hilfsmitteln sowie im Designbereich. Weil hier die technischen und wirtschaftlichen Potenziale noch lange nicht ausgeschöpft sind, ist abzusehen, dass sich die Anteile additiv gefertigter Produkte in diesen Branchen in den kommenden Jahren beträchtlich steigern werden. Ein hohes Anwendungspotenzial wird insbesondere für die Fertigung von Ersatzteilen gesehen. In der konventionellen Produktion müssen Hersteller teilweise ganze Lagerhallen über lange Zeitspannen mit Ersatzteilen, Werkzeugen und Maschinen vorhalten, um die Verfügbarkeit der Ersatzteile zu garantieren. Dies könnte durch die additive Fertigung der Ersatzteile deutlich reduziert werden.

Weitere Branchen des produzierenden Gewerbes (z.B. die Bau-, Textil- oder Nahrungsmittelindustrie) oder wissenschaftliche Disziplinen (z.B. Biotechnologie) steigern stetig ihre Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen, um mit additiven Verfahrensprinzipien neue Anwendungsfelder zu erschließen. Die Entwicklungen in diesen Bereichen befinden sich in der Regel aber noch in einer sehr frühen experimentellen Phase.

Der Einsatz von 3-D-Druckern im privaten Bereich wird sich aufgrund der gegenwärtig und auf absehbare Zeit vorherrschenden technischen Restriktionen bei Geräten im Preissegment bis 5.000 Euro sowie der anspruchsvollen Bedienung der Geräte bis auf Weiteres auf die Herstellung einfacherer Kunststoffgegenstände wie Figuren, Spielzeug, Wohn- oder Modeaccessoires beschränken. Im schulischen bzw. universitären Umfeld ergeben sich gegebenenfalls sinnvolle Anwendungen für die Fertigung von Anschauungsmodellen oder Unterrichtsmaterialien.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Stand der Technik und der Forschung III.

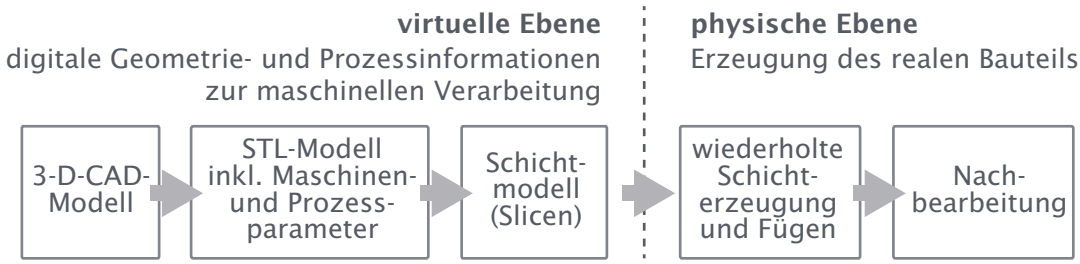
Überblick zu Verfahren und Materialien 1.

Das Grundprinzip der additiven Fertigungsverfahren ist unabhängig von der konkreten technischen Umsetzung immer gleich: Auf der Grundlage eines digitalen 3-D-Modells wird das gewünschte Objekt durch gezieltes schichtweises Aufbringen des Ausgangsmaterials sukzessive physisch aufgebaut. Der Fertigungsprozess lässt sich in drei grundlegende Schritte unterteilen:

1. Erzeugung des digitalen 3-D-Modells,
2. maschinelle Anfertigung (Druck),
3. Nachbearbeitung.

Die Abbildung III.1 zeigt die Abfolge dieser Schritte in einem Prozessmodell.

Abb. III.1 Prozessmodell der additiven Fertigung



Quelle: Heil 2014, S. 7

Erzeugung des digitalen 3-D-Modells und der Fertigungsvorlage

Als erster Schritt wird ein Computermodell des Werkstücks erstellt (3-D-Modell), welches die geometrische Gestalt des Bauteils definiert (dazu und zum Folgenden Heil 2014, S. 6 f.). Dies kann entweder durch Konstruieren/Entwerfen mittels CAD-Software oder durch einen 3-D-Scan eines existierenden Objektes erfolgen. Die Geometrie der Oberflächen wird üblicherweise mittels dreieckiger Facetten angenähert und als Datensatz im Standard-Tessellation-Language-Format (STL-Format) abgelegt. Viele CAD-Systeme nutzen das STL-Format, und alle gängigen Anlagen für die additive Fertigung können damit gesteuert werden. Es existieren aber auch neuere Datenformate, die u.a. auch Informationen über Material, Farbe und Oberflächentextur des Objektes enthalten, z.B. das Additive-Manufacturing-File-Format (AMF-Format). Damit die Daten für den maschinellen Fertigungsprozess genutzt werden können, müssen bestimmte prozess- und maschinen-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

spezifische Parameter hinzugefügt werden (Positionierung auf der Bauplattform, gegebenenfalls Stützkonstruktionen) sowie materialspezifische Eigenschaften berücksichtigt werden (z.B. Schrumpfverhalten bei der Abkühlung oder Aushärtung). Anschließend wird das 3-D-Modell virtuell in dünne Schichten zerlegt (Slicing), welche die Information enthalten, an welchen Stellen der schichtweise Materialauftrag erfolgen soll. Daraus werden schließlich die Steuerungsbefehle für den maschinellen Fertigungsablauf generiert (z.B. Bewegungsablauf und Leistung des Lasers). Das Ergebnis dieses Arbeitsschrittes ist eine digitale Fertigungsvorlage, die alle Informationen enthält, um die additive Fertigungsanlage zu steuern und das gewünschte Werkstück physisch herzustellen.

Maschinelle Anfertigung

Die genaue Art der Fertigung wird durch das eingesetzte Verfahren bestimmt. Generell existiert ein Trade-off zwischen Genauigkeit und Geschwindigkeit der Fertigung. Je dünner die aufgetragenen Schichten sind, desto öfter muss der Vorgang wiederholt werden, bis das Bauteil vollständig aufgebaut ist. Bei dickeren Schichten erfolgt der Aufbau schneller, allerdings ist dann der sogenannte Treppenstufeneffekt ausgeprägter. Dieser entsteht dadurch, dass Bauteiloberflächen, die schräg zu den Schichten liegen, nur stufig ausgeführt werden können (Heil 2014, S. 7).

Nachbearbeitung

Das fertige Bauteil wird sodann aus der Anlage entnommen und gereinigt (anhaftende Pulverpartikel bzw. Flüssigkeiten und gegebenenfalls Stützstrukturen werden entfernt). Bei einigen Verfahren sind zusätzliche Arbeitsschritte erforderlich, bis das Bauteil seine endgültigen Eigenschaften erhält (z.B. Infiltrieren der Poren, Ausbrennen, Tempern). Zum Abschluss kann noch eine Oberflächenbehandlung erfolgen, u.a. um das Bauteil zu glätten oder zu versiegeln (Ätzen, Strahlen, Schleifen, Polieren, Beschichten).

Klassifizierung der additiven Fertigungsverfahren

Seit der Veröffentlichung des ersten Patents für ein additives Fertigungsverfahren im Jahr 1986[30] sind zahlreiche Varianten entwickelt worden, die sich nach verschiedenen Kriterien klassifizieren lassen (Heil 2014, S. 8):

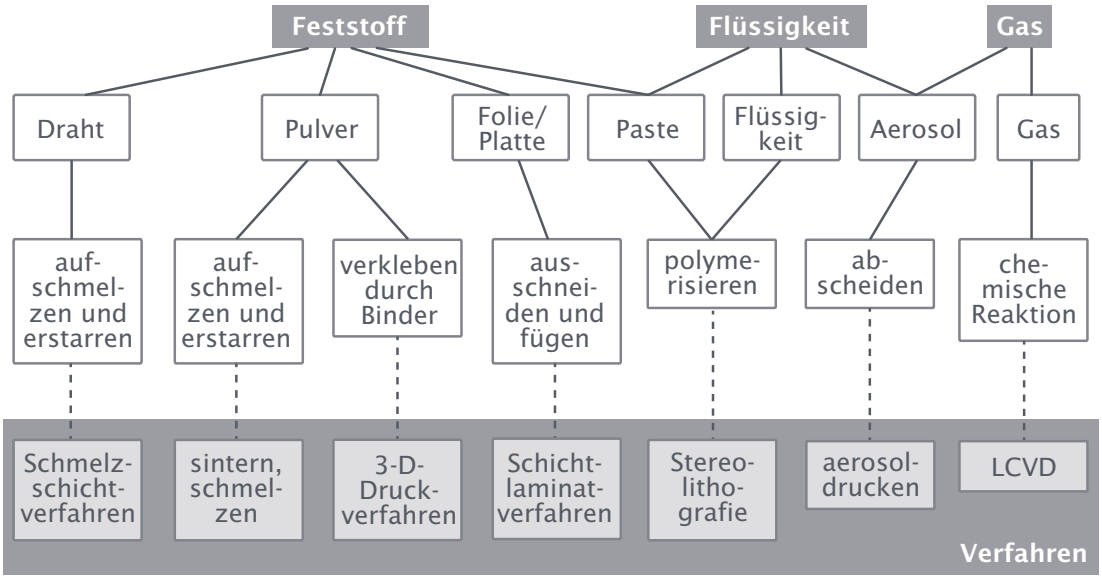
30 U.S. Patent 4.575.330 (www.google.com/patents/US4575330 [19.12.2016])

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

- dem Aggregatzustand des Ausgangsmaterials: fest (z.B. Pulver, Draht, Folie), flüssig (z.B. Paste, Flüssigkeit), gasförmig (z.B. Aerosol, Gas/Gasgemisch);
- dem verwendeten Ausgangsmaterial: z.B. Kunststoff, Metall, Keramik;
- dem Funktionsprinzip des Verfahrens.

Die Abbildung III.2 zeigt eine Übersicht der additiven Fertigungsverfahren in einer Klassifizierung, die vom Aggregatzustand des Ausgangsmaterials ausgeht.

Abb. III.2 Klassifizierung additiver Fertigungsverfahren



LCVD: Laser Chemical Vapour Deposition (laserunterstützte chemische Gasphasenabscheidung)

Quelle: nach Gebhardt 2007, S. 69

Die verschiedenen Verfahren unterscheiden sich in ihren Funktionsprinzipien und Eigenschaften wie auch hinsichtlich der Eigenschaften der damit gefertigten Produkte. Zu den Unterscheidungsmerkmalen gehören u.a.:

- die Palette der verarbeitbaren Ausgangsmaterialien,
- die mögliche Größe und Geometrie der Werkstücke,
- die Genauigkeit der Fertigung,
- die Geschwindigkeit der Fertigung,
- die mechanischen, optischen oder elektrischen Eigenschaften der Produkte,
- der Einsatzzweck der Produkte (z.B. für industrielle Anwendungen)
- und nicht zuletzt die Kosten der Fertigung.

Der mögliche Einsatzbereich der Verfahren wird durch die Kombination dieser Eigenschaften entscheidend mitbestimmt. In der Industrie sind dabei meist we-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

sentlich strengere Kriterien an Genauigkeit, Geschwindigkeit und Kosten der Fertigung anzulegen als bei Verfahren, die im privaten Bereich angewendet werden, für die das wesentliche Entscheidungskriterium oft der Anschaffungspreis des 3-D-Druckers ist.

Zur Illustration der derzeitigen technischen Möglichkeiten werden im Folgenden die Charakteristika einiger beispielhaft ausgewählter additiver Fertigungsverfahren zur Verarbeitung von Kunststoffen, Metallen, Keramiken sowie Zement/Beton beschrieben.[31]

Kunststoffe 2.

Da Kunststoffe mit extrem unterschiedlichen Eigenschaften quasi maßgeschneidert hergestellt werden können, hat sich eine große Vielfalt an kunststoffbasierten additiven Fertigungsverfahren herausgebildet. Darunter finden sich auch solche, die sich mit relativ geringem technologischen Aufwand realisieren lassen und die sich somit auch für Privatanwender eignen (3-D-Drucker). Für Verfahren zur Verarbeitung anderer Materialklassen (vor allem Metalle) liegen dagegen die Anwendungsmöglichkeiten hauptsächlich im professionellen Bereich (Forschung, Entwicklung, Industrie).

Schmelzschichtverfahren 2.1

Eines der am weitesten verbreiteten Verfahren zur Verarbeitung von schmelzbaren Kunststoffen ist das Schmelzschichtverfahren. Gebräuchlich sind auch die Bezeichnungen Fused Deposition Modeling (FDM), Fused Filament Fabrication (FFF) sowie Fused Layer Modeling (FLM). Das Verfahren eignet sich für thermoplastische Kunststoffe wie z.B. Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (ABS; Produktbeispiele: Motorradhelme, Legosteine), Polyester (Produktbespiele: PET-Flaschen, Gießharz), Polycarbonate (PC; Produktbeispiele: CDs, Gehäuse von Smartphones) oder Polylactide (PLA; Produktbeispiele: Kugelschreiber, Luftpolsterfolie). Durch Beimischungen z.B. feiner Pulver sind auch holzartige, keramische oder sandsteinartige Materialqualitäten möglich (Abb. III.3).

Vergleichbar einer sehr feinen Heißklebepistole wird das – meist als dünnes Filament vorliegende – Ausgangsmaterial in einer Düse aufgeschmolzen und über einen Steuermechanismus punktuell oder linienförmig Schicht um Schicht aufgebracht. Als Schichtdicke sind 0,025 bis 1 mm üblich. Ein Nachteil ist, dass

31 Wenn nicht anders angegeben, wurden die Zahlenangaben Peters (2015) entnommen. Weitergehende technische Details zu den Verfahren finden sich z.B. in Berger et al. (2013).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

für überhängende Geometrien Stützstrukturen erforderlich sein können. Für glatte Oberflächen kann eine Nachbearbeitung notwendig sein (z.B. kann ABS mit Aceton bedampft werden, das die Oberfläche anlöst und somit glättet). Die mögliche Bauteilgröße üblicher Anlagen reicht von wenigen cm^3 bis zu mehr als 1 m^3. Es ist eine Vielzahl von Gerätetypen auf dem Markt: 3-D-Drucker als Bausatz sind für unter 400 Euro zu haben, höherwertige für etwa 2.000 bis 3.000 Euro, industriell einsetzbare Fertigungsanlagen ab etwa 10.000 Euro.

Abb. III.3 Die Armbanduhr Jelwek Watch aus Holz

Material: 40 % recyceltes Holz mit PLA (Handelsname: Laywood D3) im Schmelzschichtverfahren verarbeitet

Quelle: © Jelwek Sp. z o. o.

Besondere Typen

- BigRep ist mit einem Bauraum von 110 x 105 x 100 cm derzeit die weltweit größte additive Fertigungsanlage für Schmelzschichtverfahren (BigRep 2015).
- Mittels Fiber Additive Manufacturing lassen sich faserverstärkte Bauteile (Kohlefaser/Glasfaser) herstellen, die eine 27-fach höhere Steifigkeit als ABS und eine bessere mechanische Festigkeit als Aluminium aufweisen (MarkForged 2016).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Stereolithografie 2.2

Hierfür werden flüssige Fotopolymere (vor allem Epoxid- oder Acrylharze) verwendet, die unter Lichteinwirkung aushärten. Mithilfe eines lenkbaren Laserstrahls werden die Stellen der mit flüssigem Harz benetzten Oberfläche des Bauteils belichtet, an denen es weiter wachsen soll. Die Stereolithografie (SLA) ist mit einer Schichtdicke von 0,02 mm eines der präzisesten Verfahren. Es können damit visuell glatte Oberflächen erzeugt werden. Der Bauraum von gängigen SLA-Anlagen liegt zwischen etwa 25 x 25 x 25 cm und 100 x 80 x 50 cm. Professionelle Anlagen kosten rund 50.000 Euro. Seit Kurzem gibt es Anlagen mit geringerer Präzision für ca. 3.000 Euro.

Besondere Typen

- Eine Variante ist das Digital Light Processing (DLP), bei dem die Belichtung durch eine große Zahl elektronisch gesteuerter Mikrospiegel (in 4-K-Auflösung etwa 8 Mio.) übernommen wird, die auf einem Chip angeordnet sind. Die von der Firma Texas Instruments entwickelte Projektionstechnologie wird in diversen Branchen wie Kino, Medizintechnik oder Fahrzeugbau (z.B. für Scheinwerfer) eingesetzt. Adaptiert für additive Fertigung hat dieses Verfahren den Vorteil, dass durch die flächige Belichtung wesentlich schnellere Prozesse als bei gewöhnlicher SLA möglich sind.
- Continuous Liquid Interface Production (CLIP) ist ein Verfahren, in dem die DLP-Technologie mit der Kontrolle der Sauerstoffkonzentration in der flüssigen Phase kombiniert wird (Sauerstoff hemmt den Polymerisationsprozess). Damit können Objekte mit einer vertikalen Detailtreue von 0,1 mm mit einer Geschwindigkeit von mehr als 30 cm pro Stunde aus einem Becken mit Fotopolymer gezogen werden (bei etwas gröberen Details von 0,3 mm sogar mit über 100 cm pro Stunde; Tumbleston et al. 2015). Damit soll das Verfahren gegenüber der gewöhnlichen SLA um bis zu einhundertmal schneller sein.[32] Der Bauraum des Geräts M1 der Firma Carbon beträgt ca. 14 x 8 x 33 cm.[33]
- 2-Photonen-Polymerisation (2PP): Bei dieser Technik muss der Kunststoff zur Auslösung der Polymerisation gleichzeitig zwei Photonen absorbieren. Dies erfordert eine extrem hohe Lichtintensität, die nur in einem

32 https://3dprinting.com/news/carbon3d-reaches-incredible-3d-printing-speeds-with-clip/ (19.12.2016)

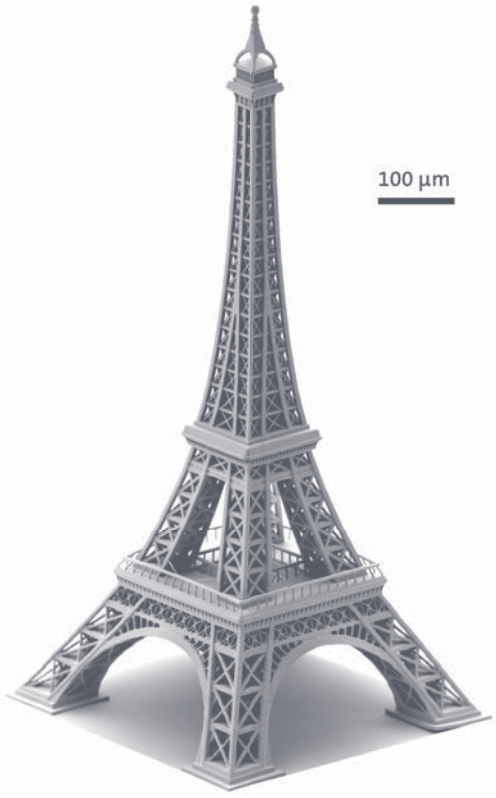
33 http://carbon3d.com/m1-printer; Bauprozess als Video unter http://science.sciencemag.org/highwire/filestream/628297/field_highwire_adjunct_files/1/aaa2397s1.mp4 (19.12.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

sehr kleinen Fokus des Laserstrahls erreicht wird. Daher sind sehr feine Strukturen mit Abmessungen im Bereich 0,1 µm erzeugbar (Abb. III.4).

- Mammoth-SLA ist eine Anlage der Firma Materialise für große Bauteile mit Abmessungen bis zu 210 x 70 x 80 cm.[34]
- Mikro-SLA: Die weltweit kleinste SLA-Anlage wurde von der Technischen Universität Wien entwickelt. Sie ist etwa so groß wie ein Milchkarton und wiegt 1,5 kg.[35]
- Bei einer Entwicklung der Universität Taiwan Tech wird das Licht eines Smartphonedisplays zum Aushärten eines flüssigen Fotopolymers genutzt. Ein Behälter mit einem Spezialharz wird auf dem Display fixiert und die Belichtung sowie ein Mechanismus, der die Bauplattform langsam anhebt, wird von einer App gesteuert. Das Gerät soll um die 100 US-Dollar kosten (Asche 2016b; Molitch-Hou 2015).

Abb. III.4 Mittels 2PP hergestelltes Modell im µm-Maßstab



Quelle: © Nanoscribe GmbH

34 www.materialise.de/3d-druck/mammut-stereolithographie-technische-daten-prototyping (19.12.2016)
35 http://amt.tuwien.ac.at/projects/micro_printer (19.12.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

3-D-Druckverfahren 2.3

Pulverpartikel werden durch gezieltes Aufbringen feinster Tröpfchen eines flüssigen Binders auf ein Pulverbett verklebt. Als Pulver können Kunststoffe, aber auch z.B. Gips oder Sand verwendet werden. Die Flüssigkeit wird mit Druckköpfen aufgebracht, die denen in konventionellen Tintenstrahldruckern ähneln, daher rührt die Bezeichnung dieser Technik als 3-D-Druckverfahren.[36] Das Bindemittel wird typischerweise mit einer Genauigkeit von etwa 0,04 mm pro Punkt aufgebracht (entspricht 600 dpi), dennoch resultieren aus dem Prozess meist raue Oberflächen mit sichtbaren Drucklinien. Gegebenenfalls im Bauteil noch vorhandene Poren können nachträglich durch Infiltrieren etwa mit flüssigem Harz gefüllt werden. Das 3-D-Druckverfahren ist sehr flexibel und erlaubt den Einsatz vieler Materialien/Materialsysteme. Die Werkstücke können beliebig eingefärbt werden, und es sind ähnliche Festigkeiten wie beim konventionellen Spritzguss möglich. Da es sich um ein recht schnelles Verfahren handelt,[37] eignet es sich sehr gut auch für größere Bauteile. Es sind Geräte mit einem Bauraum von bis zu 4 x 2 x 1 m erhältlich. Professionelle Geräte kosten 20.000 Euro und mehr.

Besondere Typen

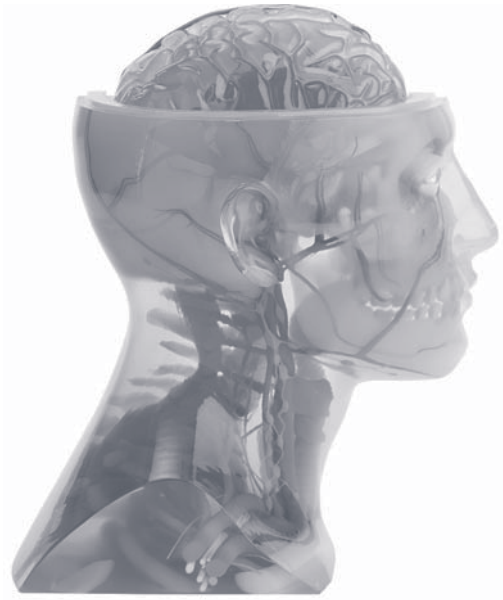
- Ein waagerechtes Förderband in Kombination mit einem schrägen Schichtauftrag ermöglicht einen kontinuierlichen Druckprozess und somit im Prinzip Bauteile beliebiger Länge und/oder eine Produktion ohne Pausen (Voxeljet 2013).
- PolyJet Modeling ist eine Kombination aus dem 3-D-Druckverfahren und der Stereolithografie: Mittels Tintenstrahltechnologie werden Fotopolymere gezielt aufgetragen und unmittelbar durch UV-Licht ausgehärtet. Eine Besonderheit ist, dass mehrere verschiedene Werkstoffe in einem Prozess verarbeitet werden können. Damit sind z.B. Bereiche mit unterschiedlicher Haptik (Oberflächenstruktur, Biegsamkeit etc.) in einem Werkstück möglich (Abb. III.5; Stratasys 2015a).

36 Der Name des spezifischen 3-D-Druckverfahrens ist nicht mit dem Begriff 3-D-Drucken gleichzusetzen, der umgangssprachlich zur Bezeichnung von additiven Fertigungsverfahren im Allgemeinen verwendet wird. Im vorliegenden Bericht wird der Begriff 3-D-Drucker ausschließlich zur Bezeichnung von Geräten für Privatanwender benutzt.

37 Das Modell »3PP0A« der Firma XYZprinting beispielsweise soll eine Druckgeschwindigkeit von bis zu 66 mm pro Stunde erreichen (https://3dprintingindustry.com/news/64101-64101 [19.12.2016]).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abb. III.5 Anatomisches Funktionsmodell mit der Haptik echten Gewebes



Quelle: © Stratasys Ltd.

Selektives Lasersintern/Laserschmelzen 2.4

Das Verfahren des selektiven Lasersinterns (SLS) eignet sich im Prinzip für alle Stoffe, die als Pulver herstellbar und schmelzbar sind. Im Kunststoffbereich sind dies zum Beispiel Polyamide (z.B. Nylon), Polystyrole (z.B. Styropor), Polyetheretherketon und andere. Das in dünnen Schichten auf der Bauplattform aufgetragene Pulver wird an den gewünschten Stellen partiell mit einem Laser aufgeschmolzen, sodass die Pulverpartikel zusammenbacken. Dieser Prozess heißt Sintern. Es ist auch die Variante möglich, dass das Pulver vollständig geschmolzen wird, in diesem Fall wird das Verfahren selektives Laserschmelzen (Selective Laser Melting [SLM]) genannt.[38] Die mögliche Schichtdicke bei diesen Verfahren beträgt etwa 0,06 bis 0,2 mm. Aufgrund der körnigen Struktur des Ausgangsmaterials entstehen beim Sintern leicht raue Oberflächen. Der Bauraum gängiger Anlagen misst von etwa 25 x 25 x 15 cm bis etwa 70 x 50 x 45 cm. Die Kosten einer typischen industriellen Anlage liegen bei etwa 70.000 Euro. Seit Kurzem ist eine einfache Anlage als Bausatz für 5.000 Euro erhältlich (Steck 2015).

38 Weitere gebräuchliche Bezeichnungen für SLS/SLM sind Powder Bed Fusion oder Lasersintern.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Eine Variante, die ohne Laser auskommt, ist das selektive Maskensintern (MS). Statt eines Lasers wird eine Infrarotlampe verwendet, welche das Pulver nur dort aufschmilzt, wo eine Maske das Licht passieren lässt.

Schichtlaminatverfahren 2.5

Dieses Verfahren wird auch Layer Laminate Manufacturing (LLM) genannt. Das gewünschte Objekt entsteht durch schichtweises Verkleben oder Verschweißen einzelner Folien oder dünner Platten. Als Werkstoffe sind viele Kunststoffe, Papiere, aber auch z.B. Metalle möglich. Die Konturen der einzelnen Schichten werden mit einem Laser oder Cutter aus der Folie bzw. Platte unter Anfall von Verschnitt ausgeschnitten. Weil hier der additive Aufbau mit subtraktiver Fertigung kombiniert wird, handelt es sich um ein hybrides Verfahren. Die Schichtdicke ist je nach verwendetem Material verschieden, typisch sind 0,08 bis 0,1 mm. Die Bauteilgenauigkeit beträgt bis zu 0,1 mm. Anlagen mit einem Bauraum von bis zu 80 x 60 x 55 cm sind auf dem Markt. Einfache Geräte kosten ab 4.000 Euro.

Metalle 3.

In Bezug auf additive Fertigungsverfahren ist der wichtigste Unterschied in den Materialeigenschaften von Metallen gegenüber Kunststoffen ihr wesentlich höherer Schmelzpunkt.[39] Daher sind für Verfahren, in denen das Schmelzen und Wiedererstarren eine Rolle spielt, wesentlich höhere Energieeinträge notwendig. Hierfür kommen typischerweise technisch aufwendige und teure Hochleistungslasersysteme zum Einsatz. Dies ist der Hauptgrund dafür, dass die additive Fertigung von Metallteilen vor allem in der Industrie von Interesse ist und sich für Privatanwender eher nicht eignet.

Selektives Lasersintern/Laserschmelzen 3.1

Mit einer möglichen Werkstoffqualität und Festigkeit teilweise sogar über derjenigen von konventionell gefertigten Teilen sind SLS/SLM die am breitesten genutzten Verfahren zur additiven Fertigung von Erzeugnissen aus Metall. Es kann eine Vielzahl von Werkstoffen verarbeitet werden, u.a. Edel- und Werkzeugstähle, Aluminium- und Titanlegierungen, Kobalt-Chrom-Legierungen

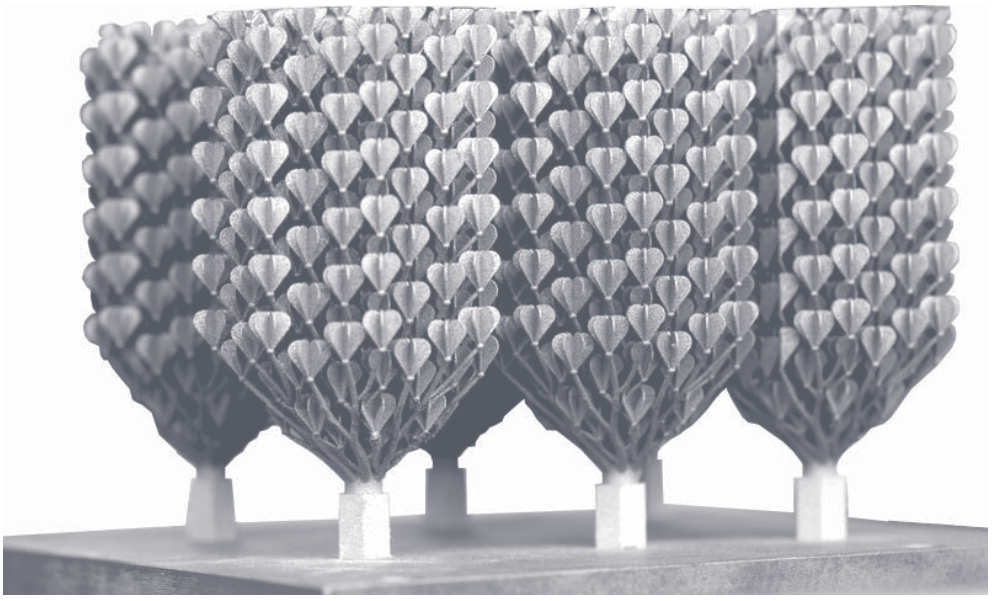
39 beispielsweise Aluminium (ca. 660 °C), Edelstahl (ca. 1.400 °C), Titan (1.670 °C); zum Vergleich Nylon (ca. 260 °C)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

sowie hochtemperaturfeste Nickellegierungen. Die erreichbaren Schichtdicken im Bereich zwischen 0,02 und 0,2 mm und Bauteilgenauigkeiten von etwa 0,02 mm versprechen ein hohes Potenzial für die industrielle Anwendung. Nachteilig gegenüber konventionellen Verfahren sind allerdings die rauen Oberflächen sowie die geringe Fertigungsgeschwindigkeit von typischerweise etwa 1 cm^3 pro Stunde. In Zukunft soll die Fertigungsgeschwindigkeit durch den gleichzeitigen Einsatz mehrerer Laser erhöht werden. Abbildung III.6 zeigt, welch komplexe Geometrien mit SLM hergestellt werden können. Das Preisspektrum reicht von etwa 10.000 Euro für ein Gerät zur Herstellung kleiner dekorativer Metallteile (v.a. Schmuck) bis oberhalb 1 Mio. Euro für Hochleistungsanlagen (eine der aktuell weltweit größten Hochleistungsanlagen für SLM mit einem Bauraum von 80 x 40 x 50 cm ist in Abb. III.7 dargestellt).[40]

Eine Variante ist das Laserauftragschweißen. Hier wird die Oberfläche des Werkstücks mit einem Laser zum Schmelzen gebracht und dann mittels eines Schweißdrahts oder Metallpulvers neues Material aufgebracht und mit dem Werkstück verschmolzen. Dieses Verfahren eignet sich gut zur Reparatur von hochwertigen Maschinen- oder Anlagenteilen, die sich nur partiell abnutzen, z.B. Turbinenschaufeln.

Abb. III.6 Mit SLM gefertigte Kühlsysteme

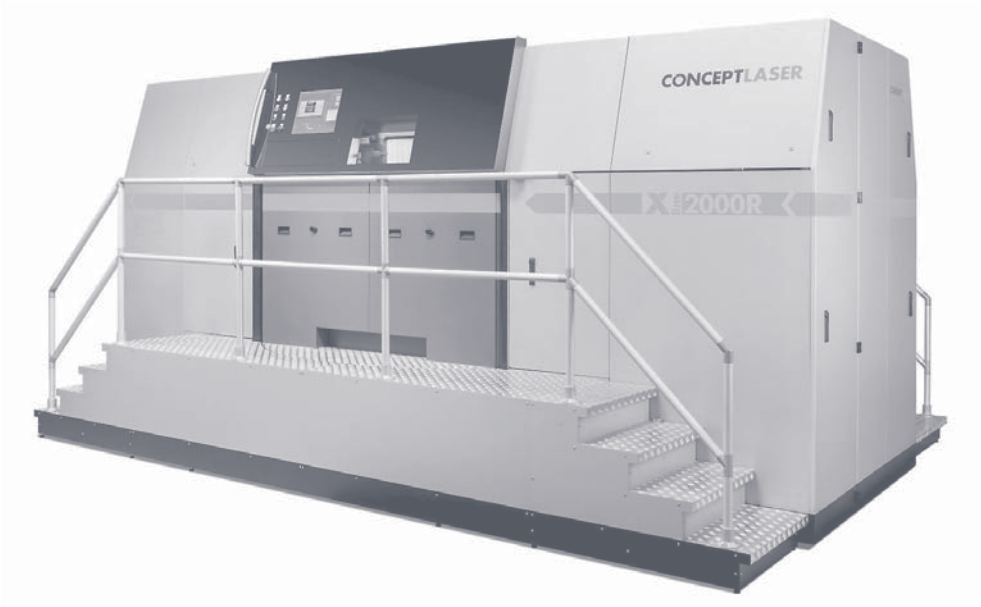


Von den verzweigenden Strukturen von Bäumen inspiriert, besitzen diese Kühlsysteme blattähnliche Strukturen (Studentenprojekt; Fraunhofer IFAM 2015).
Quelle: © Fraunhofer IFAM/Thorsten Müller

40 http://3dprintingdatabase.org/en/3dprinter (21.2.2017)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abb. III.7 Hochleistungsanlage für SLM: X LINE 2000R



Quelle: © Concept Laser GmbH

Elektronenstrahlschmelzen 3.2

Beim Elektronenstrahlschmelzen (Electron Beam Melting [EBM]) wird statt eines Lasers ein Elektronenstrahl verwendet, um das Material zu schmelzen. Ein Vorteil ist, dass eine wesentlich höhere Leistung eingebracht werden kann (z.B. 3 kW anstatt der bei Lasern üblichen 250 W; Arcam o. J.). Dies erlaubt eine höhere Fertigungsgeschwindigkeit bei allerdings recht hohem apparativem Aufwand, unter anderem weil im Vakuum gearbeitet werden muss.

3-D-Druckverfahren 3.3

Das 3-D-Druckverfahren (Kap. III.2.3) kann auch mit Metallpulvern ausgeführt werden. Es dient hier in erster Linie der Formgebung. Seine endgültigen Eigenschaften erhält das Werkstück erst in nachgelagerten Prozessschritten. Dazu wird es in einem Ofen hoch erhitzt, wobei der Binder, der die Pulverkörnchen verklebt, ausgebrannt wird und die Körnchen zusammengesintert werden. Dabei entsteht ein hochporöser Körper. Die Poren können nach Bedarf durch Infiltration mit einem bei niedrigeren Temperaturen schmelzenden Metall (z.B. Bronze) gefüllt werden.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Schichtlaminatverfahren 3.4

Ein Schichtlaminatverfahren (Kap. III.2.5), das sich für Metalle eignet, ist das Plattenpresslöten (PPL): Die Form wird aus mit Messinglot beschichteten Metallblechen ausgefräst. Anschließend werden die Bleche passgenau aufeinandergelötet.

Fluidic Force Microscopy 3.5

In einer noch sehr frühen Forschungsphase befindet sich eine als Fluidic Force Microscopy (FluidFM) bezeichnete Technik, mit der äußerst feine metallische Strukturen erzeugt werden können. Die Pixelgröße beträgt lediglich etwa 0,8 µm. Bauteile halb so dick wie ein menschliches Haar sind damit herstellbar. Mittels einer computergesteuerten Mikropipette wird Kupfersulfatlösung auf ein leitfähiges Substrat aufgebracht. Durch eine angelegte Spannung wird daraus elektrochemisch reines Kupfer abgeschieden (Hirt et al. 2016). Auch andere Metalle sind mit dieser Technik druckbar. Anwendungsmöglichkeiten für solche Mikrobauteile bestehen beispielsweise in der Uhren- oder Medizintechnik.

Keramik 4.

Aufgrund ihrer Materialeigenschaften (u.a. Sprödigkeit, sehr hoher Schmelzpunkt)[41] lassen sich komplexe Geometrien bei Keramiken mit konventionellen Verfahren wenn überhaupt nur sehr aufwendig realisieren. Sie können nur schwer gegossen, geschmiedet oder zerspanend (drehen, fräsen, schleifen) bearbeitet werden. Hier bietet die additive Fertigung eine ganz neue Flexibilität in der Formgebung. Da es additive Fertigungsverfahren auch ermöglichen, die Porosität eines Werkstücks auf eine Weise zu beeinflussen, wie es mit keinem konventionellen Verfahren möglich ist, eröffnet sich hier ein völlig neuer Horizont für innovative Anwendungen, z.B. für Filter, Katalysatorträger oder biokompatible Oberflächen (Deisinger 2010; Zocca et al. 2015).

Meist liegt das Ausgangsmaterial in Pulverform vor (bzw. als Paste oder Suspension von Pulvern). Um daraus qualitativ hochwertige Keramiken herzustellen, die eine hohe Festigkeit und Dichte sowie geringe Porosität aufweisen, sind eine präzise Prozessführung und meist der Einsatz sehr hoher Temperaturen erforderlich. Während des Sinterns kommt es zu einer Schrumpfung des Bauteils, die es für eine passgenaue Fertigung zu berücksichtigen gilt.

41 Beispielsweise schmilzt Korund (Al_2O_3) bei ca. 2.050 °C.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Lithography-based Ceramic Manufacturing 4.1

Beim Lithography-based Ceramic Manufacturing (LCM) wird eine Suspension aus Keramikpartikeln in einem flüssigen Fotopolymer mittels Stereolithografie (Kap. III.2.2) verarbeitet. Danach wird der Rohling, die Grünform, in einem Ofen hohen Temperaturen ausgesetzt. Das Polymer wird dabei zuerst bei 600 °C ausgebrannt, anschließend werden die Keramikpartikel bei 1.500 °C versintert. Eine typische Anlage arbeitet mit einem Bauraum von ca. 7,5 x 4,5 x 15 cm, einer minimalen Schichtdicke von 0,025 mm und einer Auflösung in der Schichtebene von etwa 600 dpi (entspricht 0,04 mm). Die Baugeschwindigkeit beträgt etwa 100 Schichten pro Stunde. Eine industriell einsetzbare Anlage kostet etwa 250.000 Euro. Damit können z.B. individualisierte Knochensubstitute oder Gusskerne für Turbinenschaufeln für Flugzeugturbinen gefertigt werden (Asche 2016a; Lithoz 2015).

Selektives Lasersintern 4.2

Durch Integration eines Hochleistungslasers (1.000 W, für Metalle sind etwa 250 W typisch) können mittels SLS Objekte aus hochfester Zirkonoxid- und Aluminiumoxidkeramik hergestellt werden (Peters 2015).

Solarsintern 4.3

Eine Variante, die lediglich Sand und Sonnenlicht benötigt, um Objekte aus Glas herzustellen, wurde 2011 vom Erfinder Markus Kayser vorgestellt. Mit einer Fresnellinse aus Plastik von etwa 1 m Durchmesser wird Sonnenlicht auf die Bauplattform fokussiert. Damit wird gewöhnlicher Sand aufgeschmolzen (hierfür ist eine Temperatur von ca. 1.600 °C erforderlich) und erstarrt anschließend als glasartiges Material in der gewünschten Form (Abb. III.8; Al-Dabbas 2013).[42]

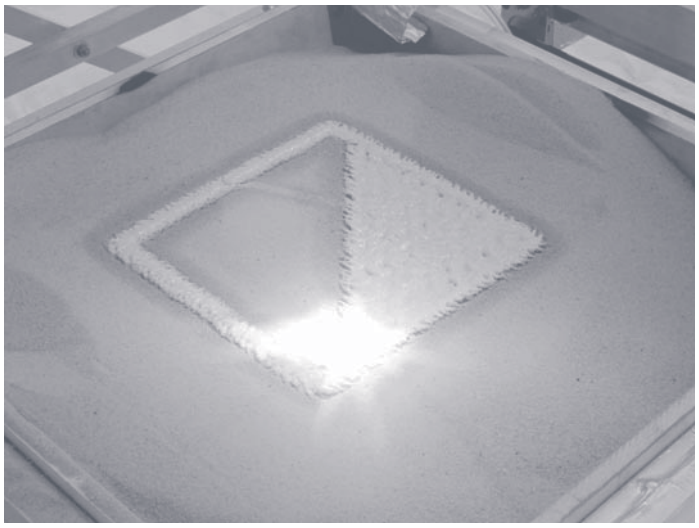
Keramiken aus polymeren Vorläufersubstanzen 4.4

Polymere, die sich unter Hitzeeinwirkung in Keramiken (z.B. SiC, Si_3N_4, BN, ALN) zersetzen, wurden bereits in den 1960er Jahren entdeckt. Eine Entwicklung, die sich in einem frühen Forschungsstadium befindet, ist die Addition von fotoaktiven Bestandteilen, wodurch die Polymere sich durch die Stereolithogra-

42 Der Bauprozess kann als Video verfolgt werden unter https://player.vimeo.com/video/25401444 (19.12.2016).

fie verarbeiten lassen. Auf diese Weise können keramische Bauteile mit nahezu beliebiger Geometrie und hervorragenden mechanischen Eigenschaften (ohne Poren, Risse, Inhomogenitäten) hergestellt werden. Diese könnten sich für diverse Hochtechnologieanwendungen eignen, z.B. für mikroelektromechanische Systeme oder zur Verkapselung elektronischer Bauteile (Eckel et al. 2016).

Abb. III.8 Solarsintern



Quelle: © Markus Kayser

Baustoffe/Beton 5.

Einige Baustoffe, vor allem Beton und andere, die auf Zement basieren, weisen Stoffeigenschaften auf, durch welche sie sich für eine Verarbeitung mit additiven Fertigungsverfahren eignen. Eine wesentliche technische Herausforderung besteht in der Skalierung der Anlagen auf eine für den Gebäudebau erforderliche Größe (Kap. II.1.7).

D-Shape 5.1

Beim Verfahren D-Shape[43] wird Sand mit einem magnesiumbasierten Binder mittels des 3-D-Druckverfahrens (Kap. III.2.3) zu einem sandsteinartigen Erzeugnis (Sorelzement) verklebt (Cesaretti et al. 2014). Der Druckkopf arbeitet in einem 4 x 4 m großen Rahmen. Die Dicke der einzelnen Schichten beträgt etwa

43 D-Shape ist ein eingetragener Handelsname der Monolite UK Ltd.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

4 bis 6 mm.[44] Eine damit gefertigte Sandsteinskulptur ist in Abbildung III.9 dargestellt. Bei einer kürzlich vorgestellten Variante des Verfahrens wird der Druckkopf durch einen Roboterarm bewegt, was ein größeres Bauvolumen erlaubt (Alec 2016).

Abb. III.9 Sandsteinskulptur Rariolaria (1,6 m hoch)

Quelle: © Enrico Dini

Concrete Printing 5.2

Über eine computergesteuerte Düse wird Beton extrudiert und direkt an den gewünschten Stellen aufgebracht (ähnlich dem Schmelzschichtverfahren bei Kunststoffen, Kap. III.2.1). Für dieses Verfahren ist es wichtig, dass der Beton eine gleichbleibende Viskosität aufweist, damit ein gleichmäßiger Materialauftrag gewährleistet werden kann. Für überhängende Geometrien werden Stützstrukturen aus einem leicht entfernbaren Material aufgebracht, ähnlich wie bei den kunststoffbasierten Verfahren (Lim et al. 2012).

44 http://d-shape.com/what-is-it/the-concept (19.12.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Mit dieser Technik fertigte die Firma WinSun in Shanghai eine Gruppe von Häusern mit der Grundfläche von je 200 m² in weniger als 24 Stunden. Die Anlage hatte die gigantischen Abmessungen von 150 x 10 x 6,6 m. Als Material wurde glasfaserverstärkter Hochleistungszement verwendet, der fester und haltbarer als konventioneller Stahlbeton sein soll. Des Weiteren wurden damit die Wandelemente für eine Villa mit 1.100 m² (Abb. III.10) gefertigt (Wu et al. 2016, S. 25 f.). Davon abgesehen besteht die Villa allerdings aus konventionellen Bauelementen (Böden, Decken, Dach, Treppen, Türen, Isolierung, Innenausbau etc.), ebenso ist die Wandverkleidung bzw. -verzierung konventioneller Machart. Ein konkreter Nutzen der additiven Bauweise ist bei diesen Beispielen kaum erkennbar, da die Konstruktionen wohl auch mit konventionellen Betonfertigteilen ausführbar wären (Wohlers/Caffrey 2016, S. 50 ff.).

Abb. III.10 Villa in Shanghai mit additiv gefertigten Wandelementen

Quelle: © WinSun Decoration Design Engineering Co.

Contour Crafting 5.3

Ähnlich wie beim Concrete Printing wird hier Beton extrudiert, jedoch erfolgt eine zusätzliche Oberflächenglättung durch einen computergesteuerten Spatel oder eine Kelle. Der Vorteil der glatten Oberfläche wird allerdings mit dem Nachteil erkauft, dass überhängende Geometrien nur schwer herstellbar sind. Die jeweils aufgetragene Schichtdicke beträgt 13 mm, was eine recht hohe Baugeschwindigkeit ermöglicht (Lim et al. 2012).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Herausforderungen und Limitationen 6.

Derzeit bestehen bei den verschiedenen additiven Fertigungsverfahren noch diverse technische Limitationen, die einem breiteren Einsatz insbesondere für industrielle Prozesse im Wege stehen. Zu nennen sind hier

- die langsame Prozessgeschwindigkeit,
- das kleine Bauvolumen,
- die geringe Feinheit der erzeugbaren Details,
- die mangelnde Reproduzierbarkeit,
- unzureichende Materialeigenschaften bzw. Oberflächengüte,
- die eingeschränkte Palette der prozesssicher verarbeitbaren Materialien.

Diese Limitationen kommen je nach Verfahren und eingesetzten Materialien in unterschiedlichem Ausmaß zum Tragen. An der Überwindung dieser Hemmnisse für den breiten Einsatz additiver Fertigungsverfahren wird derzeit intensiv gearbeitet. Substanzielle Fortschritte entstehen dabei oft in einer Mischung aus materialwissenschaftlichen und prozesstechnischen Weiterentwicklungen.

Produktqualität 6.1

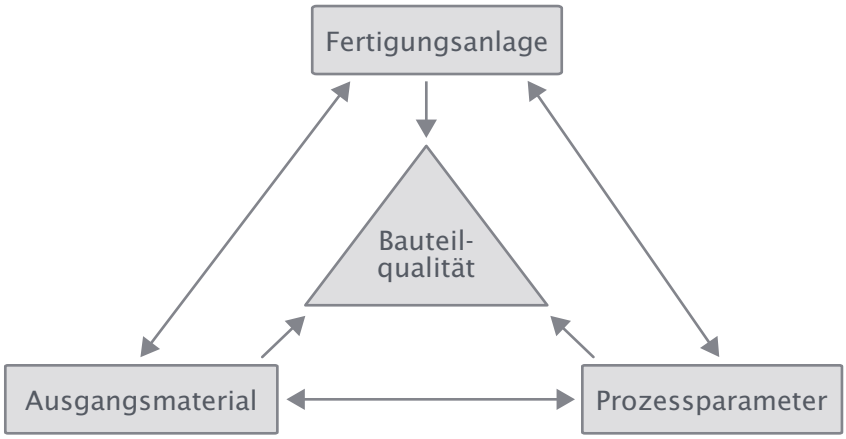
Die Produkte additiver Fertigungsverfahren besitzen ganz spezifische Material- und Bauteileigenschaften, die sich von Produkten, die mit konventionellen Verfahren, wie z.B. Spritzguss, erzeugt werden, erheblich unterscheiden können. Zudem variieren die Eigenschaften je nach Kombination von Werkstoffen, additiven Fertigungsverfahren und konkreten Prozessparametern (Abb. III.11).

Bereits kleine Abweichungen in den Ausgangsbedingungen können dabei große Wirkungen entfalten. Daher ist es durchaus möglich, dass selbst auf zwei baugleichen additiven Fertigungsanlagen mit demselben Ausgangsmaterial bei gleich eingestellten Prozessparametern (z.B. Temperatur, Geschwindigkeit des Druckkopfes/Lasers) die Produktqualität nicht völlig identisch ist. Beispielsweise könnte sich das innere Gefüge von aus Metallpulvern durch Lasersintern bzw. -schmelzen hergestellten Bauteilen (Mikrostruktur, Porosität etc.) unterscheiden und damit würden für den Einsatz der Bauteile äußerst relevante Eigenschaften wie Bruchfestigkeit und Verhalten gegenüber mechanischen Wechselbelastungen stark voneinander abweichen. Obwohl die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf diesem Gebiet in den letzten Jahren intensiv vorangetrieben wurden, bestehen hinsichtlich der resultierenden mechanischen Eigenschaften bei den vielfältigen Kombinationen von Werkstoffen und additiven Fertigungsverfahren noch erhebliche Wissenslücken (VDI 2016, S. 27 ff.). Diese

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Wissenslücken zu füllen wäre für eine wünschenswerte Standardisierung bzw. Normierung von Produktqualitäten von großer Bedeutung.

Abb. III.11 Wechselwirkungsdreieck Anlage – Werkstoff – Parameter



Quelle: nach VDI 2016, S. 27

Eine spezielle Problematik beim Lasersintern, Laserschmelzen und bei ähnlichen Verfahren, bei denen das Ausgangsmaterial aufgeschmolzen wird und dann in der gewünschten Form wieder erstarrt, sind thermisch induzierte Eigenspannungen, die im Bauteil entstehen und dessen mechanische Eigenschaften beeinträchtigen können. Diese können zwar durch eine nachträgliche Wärmebehandlung abgebaut werden, allerdings kann sich dadurch das Bauteil verformen. Durch Prozessverbesserungen in der Anlage und optimierte Konstruktionsweisen können thermisch induzierte Eigenspannungen minimiert werden. Des Weiteren können Verformungen infolge einer Wärmebehandlung beim Entwurf des Bauteils bereits berücksichtigt werden, sodass es erst danach die passgenaue Form erhält. Auch in diesem Bereich besteht noch erheblicher Entwicklungsbedarf (Kietzmann et al. 2015, S. 27; VDI 2016, S. 27).

Auch hinsichtlich der Frage, wie die Haltbarkeit additiv hergestellter Bauteile insbesondere bei dynamischen Wechselbelastungen (z.B. Vibrationen eines Motors) zuverlässig eingeschätzt und sichergestellt werden kann, gibt es noch erhebliche Wissensdefizite. Ähnliches gilt für das Alterungs- und Langzeitverhalten. Übliche Berechnungs- bzw. Simulationsmethoden können mangels Datenbasis nur eingeschränkt verwendet werden. Funktionstests realer Bauteile in praxisnahem Einsatz oder die zerstörende Materialprüfung sind sehr aufwendig und kostspielig, was insbesondere bei Einzelanfertigungen und Kleinstserien hinderlich ist. Hier erscheint es erforderlich, neue Konzepte der Qualitätssicherung zu entwickeln (VDI 2016, S. 30). Da sich Ermüdungserscheinungen von Materialien oft durch Mikrorisse an der Oberfläche ankündigen, ist es beson-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

ders ungünstig, dass additiv gefertigte Bauteile oftmals raue Oberflächen haben, bei denen diese Risse unter Umständen schwer zu detektieren sind.

Generell ist die Oberflächenqualität, insbesondere die optische und haptische Anmutung von Bauteilen aus additiver Fertigung für einige Anwendungen nicht ausreichend. Hier besteht die Notwendigkeit, diese durch nachgelagerte Schritte zu verbessern, beispielsweise durch Schleifen, Polieren, Ätzen, Tempern oder Beschichten.

Anlagenperformance/Integration in Prozessketten 6.2

Damit die additive Fertigung auch für die industrielle Serienproduktion zumindest von kleinen bis mittleren Stückzahlen attraktiver werden kann, muss die Leistungsfähigkeit additiver Produktionsprozesse in vielen Bereichen weiter gesteigert werden.

Ein entscheidender Faktor ist die Geschwindigkeit des Fertigungsprozesses, die erheblich erhöht werden muss, um den Anforderungen für eine industrielle Serienproduktion gerecht zu werden. Je größer ein Bauteil ist, umso stärker tritt dieser Nachteil in Erscheinung. So dauert beispielsweise der additive Bauvorgang eines 25 kg schweren Zylinderblocks aus Aluminium für einen Automotor auch auf einer industriellen Hochleistungsanlage für das Lasersinterverfahren aktuell noch über 12 Tage, danach muss das Bauteil aufwendig manuell von Pulverresten gereinigt und nachbearbeitet werden (Hofmann Innovation Group 2016). Neben der Beschleunigung des Schichtaufbaus (Kasten) ist daher auch die Minimierung bzw. Automatisierung vor- und nachgelagerter Produktionsschritte erforderlich. Dies beginnt bei der Datenaufbereitung und Einrichtung der Software, der Materialhandhabung und -zuführung und reicht bis zur Entnahme des Bauteils aus dem Bauraum, der Reinigung von überschüssigem Material, der Nachbearbeitung und der Qualitätskontrolle. Erreicht werden soll dies beispielsweise mithilfe fahrerloser Transportsysteme, welche mehrere parallel arbeitende Anlagen mit den Ausgangsmaterialien versorgen und die fertigen Bauteile aus dem Bauraum der Anlagen zu den Entpackstationen (wo z.B. bei pulverbasierten Verfahren robotergestützte Saugsysteme das nichtverbaute Pulver entfernen) und danach in die Nachbearbeitung bringen, wo ebenfalls Roboter die Wärmebehandlung oder Oberflächenveredlung übernehmen. Durch eine zentrale Steuerungssoftware könnten die Stillstandzeiten der Anlagen minimiert werden. Entsprechende Automatisierungslösungen befinden sich allerdings noch in der Konzeptions- bzw. bei ersten Pilotprojekten in der Aufbauphase und werden auch erst dann optimal einsetzbar sein, wenn die einzelnen additiven Produktionsschritte technisch ausgereift und damit standardisierbar sind (Asche 2016c, 2017).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Wünschenswert bzw. erforderlich ist schließlich auch eine bessere Integration der additiven Fertigung in konventionelle automatisierte Fertigungslinien. Dies könnte beispielsweise durch einen hybriden Ansatz erfolgen, bei dem konventionell gefertigte Rohlinge in einer additiven Fertigungsanlage weiterverarbeitet oder aber additiv hergestellte Bauteile automatisiert konventionellen Fertigungslinien zugeführt werden könnten (VDI 2016, S. 29).

Lasersintern von Metallen in hoher Geschwindigkeit

Die derzeit noch niedrige Prozessgeschwindigkeit bei SLS/SLM von Metallen im Bereich von wenigen cm^3 pro Stunde schränkt die Nutzungsmöglichkeiten erheblich ein. Daher wird die Entwicklung von Technologien vorangetrieben, mit denen diese Beschränkung aufgehoben werden kann.

Ein Ansatz ist es, die Scangeschwindigkeit des Lasers zu erhöhen. Hierfür müssen Laser mit höherer Leistung eingesetzt werden, z.B. mit 700 bis 1000 W statt der in kommerziellen Geräten üblichen 200 bis 400 W (Buchbinder et al. 2011). Des Weiteren können auch mehrere Laser gleichzeitig verwendet werden. Beispielsweise kann ein kürzlich vorgestelltes Hochleistungsgerät für den industriellen Einsatz mit bis zu vier Lasern mit je 700 W ausgestattet werden. Damit sollen Aufbauraten von bis zu 105 cm^3 pro Stunde erreichbar sein (SLM o.J.).

Eine weitere Möglichkeit wäre, einen Laser mit sehr feinem Fokus für den hochpräzisen Aufbau der äußeren Konturen zu nutzen und einen zweiten mit breitem Fokus und sehr hoher Leistung (z.B. 5 kW), um das Innere des Bauteils schnell auszufüllen. Insgesamt gesehen sollen in den nächsten Jahren Geschwindigkeiten von bis zu 500 cm^3 pro Stunde und langfristig sogar 5.000 cm^3 pro Stunde im Bereich des Möglichen liegen (Trechow 2016).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Additive Fertigungsverfahren in der Industrie IV.

Die mannigfaltigen Anwendungsmöglichkeiten und -potenziale der additiven Fertigung in den unterschiedlichsten Branchen sowie die generell hohen Erwartungen, die in diese Verfahren gesetzt werden, sind in Kapitel II beschrieben. Es wurde allerdings auch deutlich, dass additive Fertigungsverfahren allen Potenzialbekundungen zum Trotz – und obwohl es einige von ihnen bereits seit über 30 Jahren gibt – in der industriellen Herstellung von Endprodukten bisher nur eine marginale Rolle spielen (mit wenigen Ausnahmen, z.B. in der Dentaltechnik oder Hörgeräteindustrie). Eine wichtige Ursache hierfür ist zweifellos in der nach wie vor unzureichenden technologischen Reife vieler dieser Verfahren zu suchen, die einem industriellen Routineeinsatz noch im Wege stehen können (Kap. III).

Für eine Erklärung der bisher nur in engen Grenzen erfolgten Diffusion sind neben den technologischen aber auch weitere Ursachen in den Blick zu nehmen. Dies sind zum einen *organisatorische oder unternehmensbezogene Gründe,* die sich auf die strukturellen Voraussetzungen der Anwenderunternehmen beziehen. Von Bedeutung sind u.a. typische Kenngrößen (z.B. Branche, Sektor, Unternehmensgröße), die Qualifikationsstruktur der Beschäftigten, die Produktions-, Innovations- und Wettbewerbsstrategie der Unternehmen sowie organisatorische Merkmale der Arbeits- und Produktionsorganisation (z.B. Seriengröße, Produktkomplexität, Art der Produktentwicklung). Zum anderen sind *unternehmensexterne Kontexte* zu betrachten, die Faktoren wie beispielsweise die Marktsituation, die Einbindung in Kooperationen und Netzwerke mit anderen Unternehmen, Verbänden, Gewerkschaften, Hochschulen oder Forschungseinrichtungen, aber auch die politischen und institutionellen Rahmenbedingungen (gesetzliche Regelungen, Standards etc.) betreffen.

Angesichts der potenziellen Bedeutung der additiven Fertigung für die internationale Wettbewerbsfähigkeit und Innovationskraft des produzierenden Gewerbes in Deutschland richtet sich der Fokus dieses Kapitels auf die absehbaren Entwicklungen bei der industriellen Anwendung additiver Fertigungsverfahren in den kommenden 5 bis 10 Jahren. Bestehende Barrieren und Hemmnisse für die Diffusion der additiven Fertigung in die Industrie werden dabei besonders in den Blick genommen. Ziel ist es, politische Gestaltungsoptionen zur Förderung der Diffusion abzuleiten.

Methodisch wurde im TAB-Projekt wie folgt vorgegangen: Ausgehend von einer Analyse des Status quo wurden quantitative (Publikations- und Patentanalysen) mit qualitativen Methoden (Experteninterviews) kombiniert, um Thesen zu den Entwicklungsperspektiven, Hemmnissen und Gestaltungsoptionen zu entwickeln. Die Thesen wurden dann im Rahmen eines Expertenworkshops[45]

45 Dieser fand am 25.2.2016 im Deutschen Bundestag statt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

diskutiert und dienten der Ableitung akteursspezifischer Gestaltungsfelder zur Förderung der Diffusion der additiven Fertigung in die Industrie. Die Darstellung in diesem Kapitel basiert in wesentlichen Teilen auf dem Gutachten des Fraunhofer ISI (2016).

1. Status quo und Entwicklungsperspektiven

1.1 Additive Fertigungsverfahren in der Industrie

Wie in Kapitel II dargestellt, werden additive Fertigungsverfahren im industriellen und gewerblichen Bereich bereits seit über 30 Jahren für die Herstellung von Prototypen (Rapid Prototyping) und seit rund 25 Jahren für die Herstellung von Werkzeugen oder Gussformen (Rapid Tooling) eingesetzt. Erst seit wenigen Jahren aber lassen sich mit ihnen auch Bauteile herstellen, die über die erforderlichen mechanischen Eigenschaften verfügen, um sie auch als einbaufähige bzw. für den Verbraucher bestimmte Endprodukte zu verwenden (Rapid Manufacturing). Deren Verbreitung beschränkt sich bislang vorrangig auf die Einzel- und Kleinserienfertigung und hat in vielen Branchen noch einen ausgeprägten Pioniercharakter. Entsprechend sind auch die Marktanteile additiv gefertigter Endprodukte zumeist noch gering. Ein Einsatz additiver Fertigungsverfahren in der hochgradig automatisierten Mittel- und Großserienproduktion ist gegenwärtig nicht möglich. Es ist daher notwendig, systematisch zwischen den drei Einsatzgebieten der additiven Fertigung – Prototyping, Tooling und Manufacturing – zu unterscheiden, da anderenfalls deren Reifegrad zur Herstellung von Endprodukten überschätzt wird.

Additive Fertigungsverfahren zur Herstellung von Endprodukten erweitern die Möglichkeiten in der Produktion (dazu und zum Folgenden Thiesse et al. 2015, S. 139 f.). Konventionelle Produktionsprozesse sind generell von einer gegenläufigen Beziehung zwischen den Kriterien Effizienz und Flexibilität geprägt: Effiziente Produktionsprozesse zeichnen sich durch minimale variable Kosten und schnelle Durchlaufzeiten aus und werden typischerweise durch standardisierte Produktformen und einen hohen Automatisierungsgrad erreicht (z.B. Fließbandproduktion in der Massenfertigung). Demgegenüber bieten flexible Produktionsprozesse eine höhere Gestaltungs- und Variantenvielfalt sowie eine bessere Reaktionsfähigkeit auf Nachfrageänderungen, erfordern aber auch einen hohen Arbeits- und Personaleinsatz für die Umrüstung und Bedienung der Maschinen und Produktionsanlagen (z.B. Einzel- oder Kleinserienfertigung in Werkstätten). Zwischen der Effizienz und der Flexibilität eines Produktionsprozesses ist jeweils eine Abwägung vorzunehmen, wobei der Bereich dessen, was technisch realisierbar ist, in Abhängigkeit von den verfügbaren Fertigungsme-

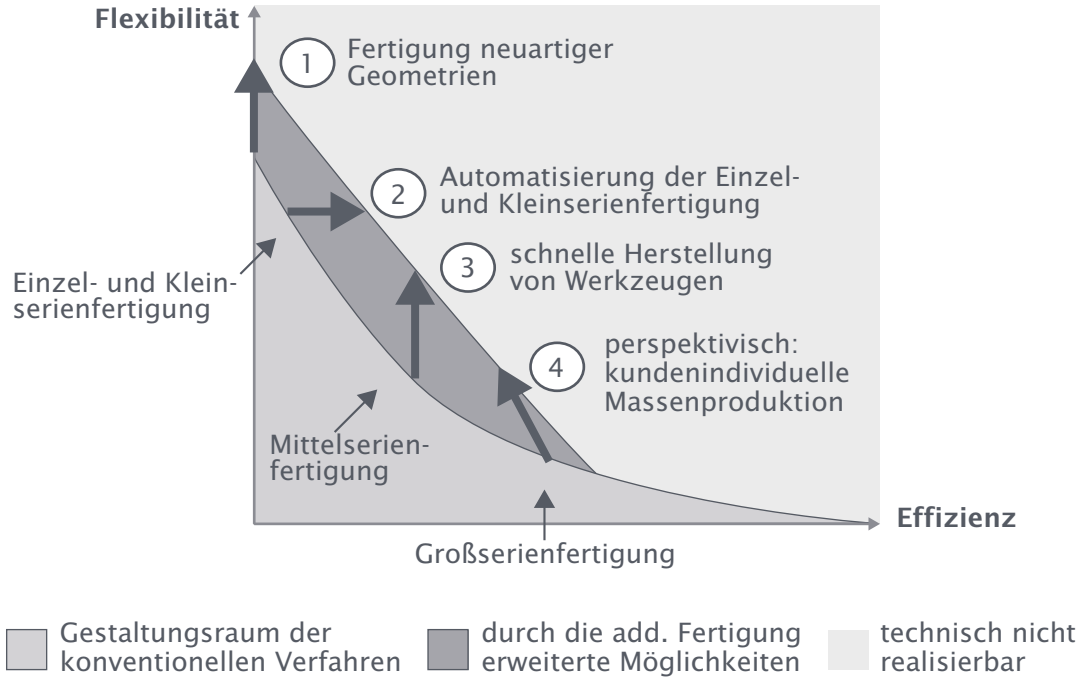
Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

thoden begrenzt ist (Abb. IV.1). Die additive Fertigung vermag den Trade-off zwischen Effizienz und Flexibilität von Produktionsprozessen zwar nicht aufzulösen, erweitert aber den Gestaltungsraum in mehrfacher Hinsicht.

1. *Höhere Flexibilität hinsichtlich der Bauteilgeometrie*: Additive Fertigungsverfahren erlauben die Herstellung komplexer, mit konventionellen Verfahren nicht realisierbarer Geometrien. Bestehende Bauteile können optimiert (z.B. integrierte Kühlkanäle in Gussformen) oder neuartige Produkte geschaffen werden (z.B. bionische Strukturen im Leichtbau). Hier beschränkten sich die Möglichkeiten zurzeit allerdings noch auf die Bereiche der Einzel- und Kleinserienfertigung.
2. *Steigerung der Effizienz in der Einzel- und Kleinserienfertigung*: In diesen Bereichen der Produktion können viele manuelle Arbeitsschritte der konventionellen Fertigung durch additive Fertigungsverfahren ersetzt und damit stärker automatisiert werden. Zusätzlich entfällt der zeit- und kostenintensive Bau von speziellen Werkzeugen und Formen. Dadurch lassen sich Werkzeug- und gegebenenfalls Lohnkosten reduzieren, zudem sind schnellere Herstellzeiten realisierbar. Für Kunststoffbauteile beispielsweise ist die additive Fertigung bis hin zu Stückzahlen von etwa 1.000 pro Jahr typischerweise die wirtschaftlichste Option (VDI 2016, S. 21).
3. *Erhöhung der Flexibilität in größeren Serien*: Der Einsatz von additiven Fertigungsverfahren zur Herstellung von Erzeugnissen in größeren Stückzahlen ist aufgrund der bestehenden technischen Limitationen derzeit noch nicht wirtschaftlich. An der Überwindung dieser Hemmnisse wird derzeit intensiv gearbeitet (Kap. III.6). Weil die additive Fertigung aber im Vergleich zur konventionellen eine schnellere Herstellung von Werkzeugen erlaubt, kann sie schon heute auch in größeren Serien zur Steigerung der Flexibilität beitragen, etwa wenn Produktänderungen innerhalb einer Serie neue Gussformen notwendig machen. Um ein neues Produkt schneller auf dem Markt zu platzieren, kann schließlich eine additive Pilotfertigung in Betracht gezogen werden, bis die konventionelle Serienproduktion anläuft (VDI 2016, S. 21).
4. *Individualisierung der Massenproduktion*: Sollten additive Fertigungsverfahren in einigen Jahren auch in der Mittel- und gegebenenfalls sogar Großserienfertigung Fuß fassen können, würden sich perspektivisch ganz neue Möglichkeiten für Unternehmen eröffnen, die wachsende Nachfrage der Kunden nach individuellen Erzeugnissen zu bedienen. Bis es soweit ist, können konventionelle Serienprodukte durch additiv gefertigte (personalisierte) Ergänzungen aufgewertet werden (VDI 2016, S. 24). Für die Großserienfertigung baugleicher Produkte für den Massenmarkt eignen sich additive Fertigungsverfahren hingegen nicht, da konventionelle Methoden wirtschaftlicher sind (es sei denn, die fraglichen Erzeugnisse sind aufgrund ihrer Komplexität nur additiv zu fertigen).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abb. IV.1 Trade-off zwischen Effizienz und Flexibilität in der konventionellen im Vergleich zur additiven Fertigung



Quelle: nach Thiesse et al. 2015, S. 140

Marktentwicklung 1.2

Die Branche rund um die additive Fertigung umfasst neben den additiven Fertigungsanlagen auch Materialien, Software sowie Dienstleistungen und erlebt ein rasantes Wachstum. Gemäß der wohl meistzitierten Prognose der Beratungsfirma Wohlers Associates Inc. stieg das weltweite Marktvolumen von 3 Mrd. US-Dollar im Jahr 2013 auf rund 4,1 Mrd. US-Dollar 2014. Wohlers Associates (2015) prognostiziert, dass der globale Markt für die additive Fertigung 2016 die Marke von 7 Mrd. US-Dollar überschreiten und bis 2020 mehr als 21 Mrd. US-Dollar umfassen wird, was einer jährlichen Wachstumsrate von über 30 % entspricht. Wie ein Vergleich mit Zahlen aus früheren Publikationen zeigt, unterliegen diese Prognosen jedoch großen Unsicherheiten. So ging die letzte Schätzung im Jahr 2012 für das Jahr 2019 noch von einem Marktvolumen von lediglich 6,5 Mrd. US-Dollar aus (Wohlers Associates 2012).

Eine mittlere Prognose liefern Ernst & Young (2016): Hier wird bei einem Marktvolumen von 3 Mrd. US-Dollar im Jahr 2015 von einem bis 2020 anhaltenden Wachstum von 25 % pro Jahr ausgegangen, womit 2020 ein Marktvolumen von 12 Mrd. US-Dollar erreicht werden würde.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Konservativere Schätzungen gehen stattdessen nur von einem Marktvolumen von 7,1 Mrd. US-Dollar im Jahr 2020 (Frost & Sullivan Limited 2013) bzw. 7,7 Mrd. Euro im Jahr 2023 (Roland Berger 2013) aus, was in etwa vergleichbar mit der früheren Abschätzung von Wohlers Associates aus dem Jahr 2012 ist. Doch auch diese konservativeren Schätzungen entsprechen beachtlichen zweistelligen Wachstumsraten.

Da bei den verschiedenen Marktprognosen unterschiedliche Abgrenzungen der betrachteten Sektoren und vielfach sehr unterschiedliche Rahmenannahmen getroffen werden, die nicht immer transparent kommuniziert werden, sind Studien dieser Art nicht eins zu eins vergleichbar.

Eine zentrale Grundannahme, die vielen Projektionen zugrunde liegt, ist, dass in absehbarer Zeit nicht mit Sättigungseffekten zu rechnen ist. Dies kann mit dem Argument begründet werden, dass durch die fortschreitende Weiterentwicklung der Technologien deren Kosten im Vergleich zu konventionellen Verfahren sinken, wodurch die Nachfrage auch für neue Anwendungen steigt und somit der Markt insgesamt wächst. Diese Annahme kann aber auch kritisch hinterfragt werden: Sicherlich lassen sich ständig weitere potenzielle Anwendungsfelder und damit auch Märkte identifizieren. Wie die Erfahrungen mit anderen Technologien jedoch zeigen (z.B. Brennstoffzellen, Industrieroboter), werden mit zunehmender Spezialisierung der Anwendungsfelder auch die Entwicklungsaufwände bzw. -perioden für technologischen Fortschritt tendenziell höher bzw. länger.

Auch sollte der Umstand, dass es sich bei den Urhebern dieser Studien vielfach um Beratungsunternehmen handelt, die gleichzeitig als Technologieberater für additive Fertigungsverfahren auftreten, bei der Interpretation der Zahlen nicht außer Acht gelassen werden.

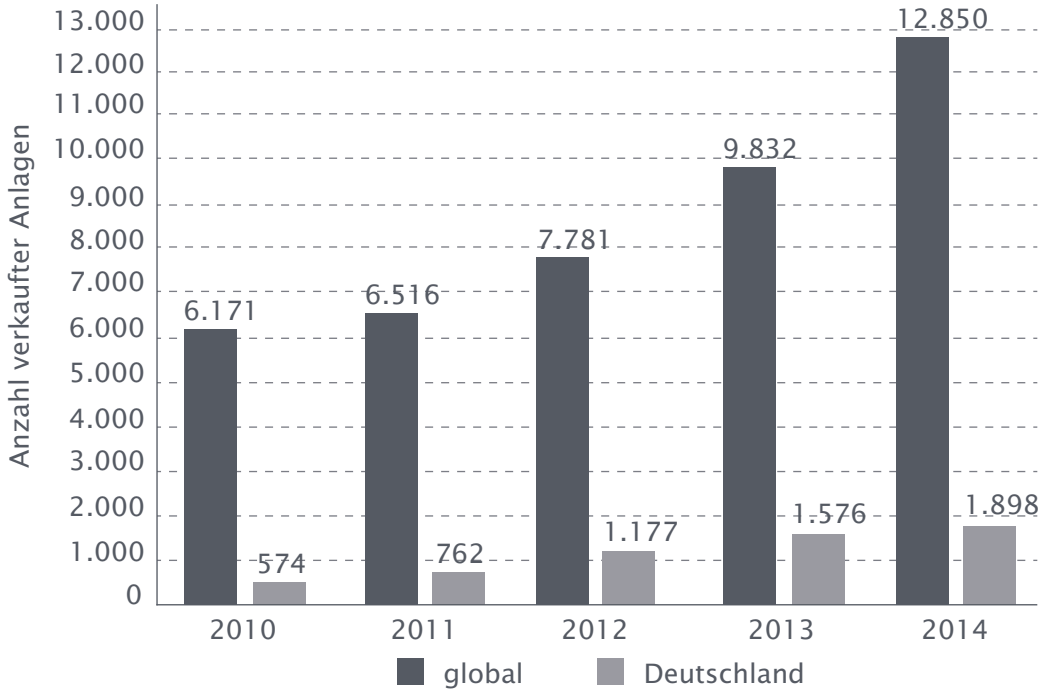
Nichtsdestotrotz deutet alles darauf hin, dass additive Fertigungsverfahren mittlerweile einen technischen Reifegrad erreicht haben, der eine sukzessive Diffusion technischer Lösungen in die industrielle Praxis erlaubt und Wachstumspotenziale in bestehenden Märkten sowie die Erschließung neuer Märkte ermöglicht.

Verbreitung additiver Fertigungsanlagen in der Industrie

Das bereits hohe Marktwachstum bestätigt sich auch bei der Betrachtung der Anzahl verkaufter additiver Fertigungsanlagen für den industriellen Bereich (Preis höher als 5.000 US-Dollar). Wie die Abbildung IV.2 zeigt, wurden hier in den letzten Jahren weltweit Wachstumsraten von 20 bis 30 % pro Jahr erreicht. Seit 2012 bewegt sich der Anteil der in Deutschland verkauften Anlagen bei etwa 15 % des Gesamtmarktes und wächst im Gleichschritt mit der internationalen Entwicklung.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abb. IV.2 Anzahl verkaufter industrieller additiver Fertigungsanlagen (weltweit und in Deutschland)

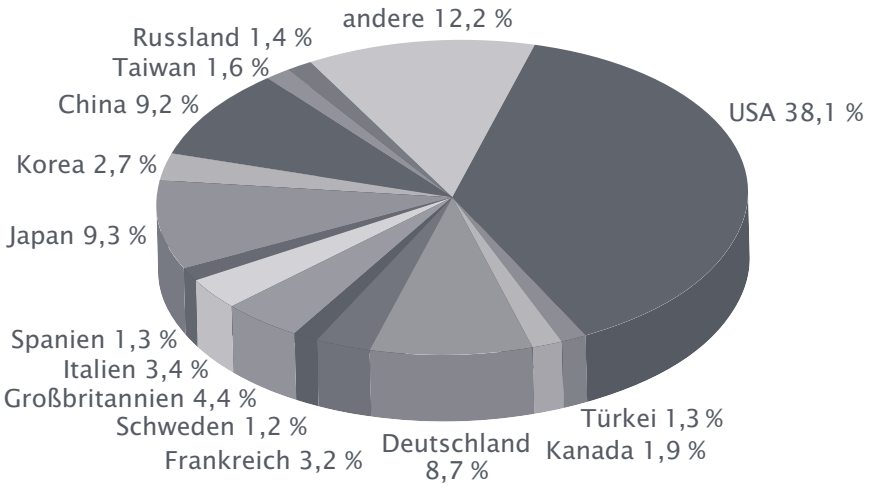


Eigene Darstellung nach Richter/Wischmann 2016, S. 11 f.

Bei der kumulierten Betrachtung der seit 1988 installierten additiven Fertigungsanlagen für den industriellen Bereich haben US-amerikanische Firmen einen Marktanteil von 38 %, gefolgt von Japan (9,3 %), China (9,2 %) und Deutschland (8,7 %). In anderen Ländern wurden bisher weit weniger Anlagen installiert (Abb. IV.3). Eine ähnliche Verteilung zeigt sich auch mit Blick auf die jüngeren Entwicklungen: Im Jahr 2014 wurden die meisten Anlagen in den USA installiert (39,2 %), gefolgt von China (12 %), Japan (8,3 %) und – mit deutlichem Abstand – Deutschland (5,5 %) (Abb. IV.4). Im Regionenvergleich sind die meisten Anlagen in Nordamerika (40,1 % im Jahr 2014) in Betrieb. Auf Platz 2 und 3 rangieren Europa (28,3 %) und Asien (27,0 %) (Wohlers Associates 2015, S. 29 f.). Die größten Wachstumschancen werden dem asiatischen Markt zugeschrieben (Wohlers Associates 2015).

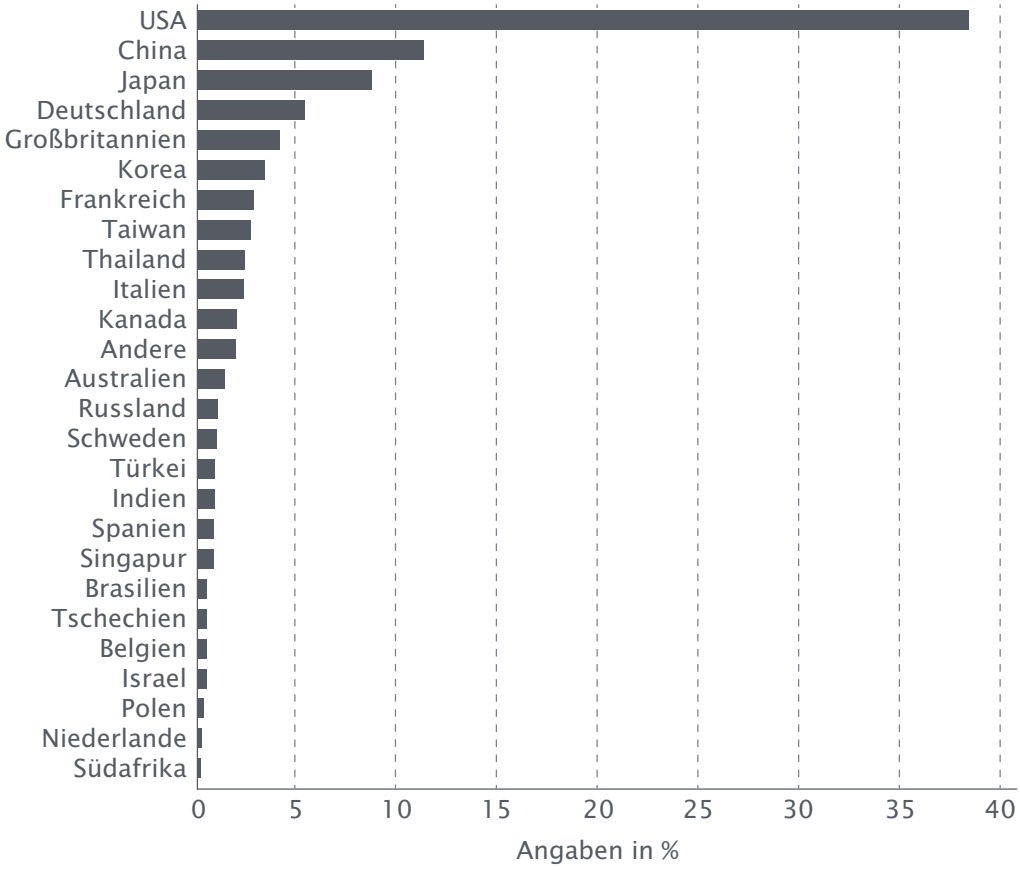
Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abb. IV.3 Länderanteile installierter Anlagen (kumuliert 1988–2014)



Quelle: Wohlers Associates 2015, S. 30

Abb. IV.4 Im Jahr 2014 installierte Anlagen nach Ländern



Eigene Darstellung nach Wohlers Associates 2015, S. 30

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Förderaktivitäten im internationalen Vergleich 1.3

Für ein anhaltend hohes Marktwachstum im Bereich der additiven Fertigung dürften auch die in den letzten Jahren markant gestiegenen öffentlichen und privaten Investitionen in Forschung und Entwicklung gesorgt haben. Eine Reihe von Ländern hat mittlerweile staatliche Förderprogramme aufgelegt, wobei Intensität und politische Intentionen der Programme teils sehr unterschiedlich sind.

Internationale Aktivitäten

Die USA (Kasten), aber auch beispielsweise Großbritannien oder Japan, deren verarbeitendes Gewerbe in den vergangenen Jahrzehnten stark eingebrochen ist, erhoffen sich von der additiven Fertigung wichtige Impulse für eine Reindustrialisierung der heimischen Wirtschaft (dazu und zum Folgenden Fraunhofer ISI 2016, S. 58 ff.). Durch deren Einsatz sollen vormals ins Ausland ausgelagerte Produktionsprozesse wieder zurückgeholt und langfristig neue Arbeitsplätze geschaffen werden (Kap. V.1.2). Ferner stellt in vielen Industriestaaten das Ziel der Digitalisierung der Produktion einen wichtigen Grund für die Förderung der additiven Fertigung dar, welcher – anders als in Deutschland – eine zentrale Rolle in den jeweiligen Digitalisierungsstrategien beigemessen wird.

Die Europäische Kommission sieht in der additiven Fertigung einen Treiber für den digitalen Wandel in Europa und eine Chance für einen Wachstumsschub im produzierenden Gewerbe. Themenspezifische, auf additive Fertigungsverfahren zugeschnittene Förderprogramme gibt es zwar nicht, gleichwohl wurden im 7. Forschungsrahmenprogramm (2007 bis 2013) über 60 Forschungsprojekte zur additiven Fertigung mit über 160 Mio. Euro gefördert (Europäische Kommission 2014, S. 1). Im 8. Forschungsrahmenprogramm »Horizont 2020« (2014 bis 2020) starteten bis Mitte 2015 bereits 28 Projekte zur additiven Fertigung mit einem Förderrahmen von rund 77 Mio. Euro (Esteban Muniz 2016, S. 12).

Förderung der additiven Fertigung in den USA

In der Strategie zur Reindustrialisierung der US-amerikanischen Wirtschaft stellt die additive Fertigung einen zentralen Baustein dar. In seiner Ansprache zur Lage der Nation 2013 erwähnte Präsident Obama das revolutionäre Potenzial der Technologie für das verarbeitende Gewerbe. Bereits 2012 hatte die Regierung das Programm National Network of Manufacturing Innovation (NNMI) ins Leben gerufen, in dessen Rahmen im selben Jahr das National Additive Manufacturing Innovation Institute (NAMII, auch bekannt

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

als America Makes) gegründet wurde. Das Institut ist als öffentlich-private Partnerschaft mit mittlerweile über 170 Mitgliedern organisiert. Dazu gehören Universitäten, Forschungseinrichtungen, öffentliche Institutionen (verschiedene Ministerien, die NASA etc.) sowie über 100 private Unternehmen, darunter Schwergewichte wie Boeing, Honeywell, General Electric, diverse Anlagenhersteller, aber auch z.B. die Siemens AG. Ziel ist es, die Diffusion additiver Fertigungsverfahren in die Industrie zu beschleunigen, neue Anwendungsfelder zu erschließen und den Zugang für kleinere Unternehmen zu Pilot- und Produktionsanlagen zu fördern. Dafür standen bis 2016 55 Mio. US-Dollar aus dem Bundeshaushalt zur Verfügung, weitere 55 Mio. US-Dollar steuerten die Industrie, Universitäten und einige Bundestaaten bei. Für die nächsten 5 Jahre sind weitere 75 Mio. US-Dollar eingeplant.

Ferner bezuschusst etwa das U.S. Department of Energy die Technologie- und Materialforschung zur additiven Fertigung am Oak Ridge National Laboratory und am Lawrence Livermore National Laboratory. Hier richtet sich das Forschungsinteresse auch auf militärische Anwendungen.

Quellen: America Makes 2016; Bechthold et al. 2015, S. 58 f.; Fey 2016, S. 12

Falls die additive Fertigung tatsächlich zur Reindustrialisierung von Europa und den USA beitragen sollte, geschähe dies zum Nachteil jener Länder, die bislang aufgrund geringer Lohnkosten attraktive Produktionsstandorte sind. Solche Befürchtungen scheinen im Besonderen in China zu existieren, wo die Regierung die Entwicklung der additiven Fertigung allem Anschein nach sehr strategisch angeht und seit 2013 den Aufbau eigener Forschungs- und Technologiekapazitäten mit beträchtlichen staatlichen Mitteln unterstützt (Kasten).

Förderung der additiven Fertigung in China

Was staatliche Förderaktivitäten in China angeht, sind die öffentlich zugänglichen Informationen (zumindest in englischer Sprache) lückenhaft und zum Teil auch widersprüchlich. Laut Medienberichten kündigte die chinesische Regierung 2013 ein mit 245 Mio. US-Dollar dotiertes Technologieförderprogramm zur additiven Fertigung an, welches über 3 Jahre (Teschler 2013), anderen Quellen zufolge über 7 Jahre laufen soll (Brooke 2013). Mit den Mitteln sollen u.a. zehn regionale Technologiezentren für die additive Fertigung aufgebaut werden, um die notwendige Forschungsinfrastruktur zur Verfügung zu stellen, sowie die universitäre Forschung unterstützt werden.

Im Februar 2015 veröffentlichte das Ministerium für Industrie und Informationstechnologien den »Additive Manufacturing Industry Promotion Plan 2015–2016«. Ziele sind u.a.:

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

- bis Ende 2016 ein funktionierendes industrielles System für die additive Fertigung aufzubauen,
- jährliche Wachstumsraten von mindestens 30 % zu erreichen,
- in bestimmten Anwendungsbereichen (u.a. der Luftfahrt) an die internationale Spitze vorzudringen sowie
- einen bedeutenden Teil des internationalen Marktes zu kontrollieren.

Erreicht werden soll dies mit staatlichen Forschungs- und Technologieförderungsmaßnahmen, Kreditunterstützung bzw. -garantien sowie der Rekrutierung ausländischer Fachkräfte. Über den Erfolg des Planes ist bisher nichts bekannt. Die Zielsetzung dürfte allerdings zu anspruchsvoll sein, um sie in nur 2 Jahren zu erreichen – zugleich aber veranschaulicht der Plan die chinesischen Ambitionen in Bezug auf die additive Fertigung. So soll es auch Pläne geben, alle der rund 400.000 Grundschulen des Landes mit 3-D-Druckern auszustatten. Schließlich wird die additive Fertigung im Programm »Made in China 2025« explizit als eine jener Technologien aufgeführt, die China dringend weiterentwickeln und sich aneignen müsse.[46]

Quellen: Bechthold et al. 2015, S. 60; Fey 2016, S. 12 f.; IGCC 2016, S. 211 ff.; Krassenstein 2015a

Einige Länder, die in den Sektoren des verarbeitenden Gewerbes bisher weniger stark aufgestellt sind, sehen die additive Fertigung als Chance, ihren Anteil an der weltweiten industriellen Produktion zu steigern. Dabei profitieren sie vom vergleichswiese niedrigschwelligen Einstieg in die additive Fertigung. Im Vergleich zu den meisten konventionellen Produktionsmethoden sind die Investitionen in die universell einsetzbaren additiven Fertigungsanlagen geringer und der Kompetenzvorsprung, den beispielsweise Deutschland oder die USA in diesem Feld haben, scheint eher aufholbar. Südafrika und Australien hingegen investieren in Entwicklungsprojekte zur additiven Fertigung u.a. mit dem Ziel, die heimischen Rohstoffvorkommen (vor allem an Titan) künftig in einem höheren Grad im eigenen Land weiterverarbeiten zu können (Fraunhofer ISI 2016, S. 61 f.). In Singapur wurde Mitte 2016 das Singapore Center for 3-D-Printig eröffnet. Dieses Forschungszentrum soll von der National Research Fundation über die nächsten 10 Jahre mit umgerechnet rund 31 Mio. US-Dollar gefördert werden. Mindestens weitere 30 Mio. US-Dollar sollen von anderen staatlichen Behörden und der Industrie beigesteuert werden (NTU 2016).

46 »Countries, both developed and developing, are reshaping their competitiveness as new technologies, including 3D printing, mobile Internet, cloud computing and new energy, emerge and China needs to urgently improve its ability to innovate and grasp these cutting-edge technologies« (State Council of PRC 2015).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Tab. IV.1 Förderung der additiven Fertigung im Ausland (Auswahl)

Land	Fördervolumen	politische Zielsetzungen	Vorgehensweise
USA	185 Mio. US-Dollar (2012–2020) öffentliche und private Mittel für America Makes; weitere Förderung durch Ministerien	Reindustrialisierung; Schaffung von Arbeitsplätzen; Digitalisierung	siehe Kasten
Großbritannien	115 Mio. britische Pfund (2012–2022), davon rund 30 Mio. britische Pfund durch die Industrie	Reindustrialisierung	Projektförderung (mit Industriepartnern); seit 2015 gibt es die industriegeführte »UK National Strategy for Additive Manufacturing «
Japan	38 Mio. US-Dollar; weitere Investitionen geplant	Reindustrialisierung	Projektförderung, davon 80 % für die Entwicklung industrieller Anlagen im Metallbereich
Europäische Union	160 Mio. Euro im 7. Forschungsrahmenprogramm; 77 Mio. Euro bereits bewilligte Mittel für Horizont 2020	additive Fertigung als Treiber für digitalen Wandel und Stärkung des produzierenden Gewerbes in Europa	Forschungs- und Entwicklungsförderung durch die Forschungsrahmenprogramme
China	245 Mio. US-Dollar im Zeitraum 2013 bis 2015 bzw. 2019	Befürchtung der Rückverlagerung von Produktion in die Industrieländer	siehe Kasten
Südafrika	25 Mio. US-Dollar (seit 2014); weitere Ausgaben geplant	Nutzung von Rohstoffvorkommen, v. a. Titan; Stärkung des Produktionssektors	Entwicklungsprojekte (mit Industriebeteiligung); seit 2016 gibt es die »Additive Manufacturing Strategy« des Ministeriums für Wissenschaft und Technologie
Australien	k. A.	Nutzung von Rohstoffvorkommen	Projektförderung; Aufbau eines großen Forschungszentrums (geplant)
Singapur	61 Mio. US-Dollar (ab 2016 für 10 Jahre); teilweise industriefinanziert	Förderung des Wachstums; nationale Sicherheit	Bündelung der Forschungskompetenzen im Singapore Centre for 3D printing; Fokus auf Luftfahrt, Verteidigung, Bauwesen, Produktion

Quellen: Fraunhofer ISI 2016, S. 63 ff.; Innovate UK 2016, S. 27; Tess 2016

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Schließlich investieren einige Regierungen auch in die Nutzung additiver Fertigungsverfahren für militärische Anwendungen (Kap. II.1.13). Tabelle IV.1 bietet einen Überblick, welche Regierungen weltweit vergleichsweise hohe Investitionen in die additive Fertigung beschlossen haben und welche Gründe sie dafür haben (soweit aus öffentlich zugänglichen Quellen bekannt).

Förderaktivitäten in Deutschland

In Deutschland existiert bislang keine übergeordnete politische Förderstrategie für die additive Fertigung, wie es sie beispielsweise in den USA oder offenbar in China gibt. Die Bundesregierung setzt hier analog zu anderen Technologiebereichen primär auf die institutionelle Förderung sowie die Projektförderung des Bundes. Laut Angaben der Bundesregierung (2013b, S. 3) wurden zwischen 2003 und 2013 im Rahmen der Projektförderung über 21 Mio. Euro an Fördermitteln für Forschung und Entwicklung im Bereich der additiven Fertigung vergeben.[47] Seit 2013 wurden die Förderaktivitäten des Bundes deutlich ausgebaut, einerseits für spezifische Forschungsvorhaben zu einzelnen Anwendungsbereichen der additiven Fertigung, andererseits auch für Teilvorhaben in großen, technologieoffenen Förderprogrammen. Einige Beispiele für größere Vorhaben sind:

- Das durch das BMBF geförderte Verbundprojekt »Additiv gefertigte Hochleistungskomponenten aus Titanlegierungen und Titanaluminid – Prozessbeherrschung, Charakterisierung, Simulation (addef)« wird mit 2,65 Mio. Euro unterstützt (Laufzeit: 2014–2017).
- Das Verbundprojekt »Herstellung vitaler Herzklappen unter Verwendung von Tissue Engineering und 3D-Druck (3D-TERM)« wird ebenfalls vom BMBF mit insgesamt 3,45 Mio. Euro gefördert (Laufzeit: 2014–2017).
- Das Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi) investiert rund 1 Mio. Euro in die Entwicklung und Herstellung von ultraleichten Metallspiegeln aus Aluminiumlegierungen durch additives Laserschmelzen (Laufzeit: 2014–2017).
- Im Rahmen des BMBF-Regionalförderprogramms »Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation« zur Förderung von Kooperationen zwischen Unternehmen und Forschungseinrichtungen in den neuen Bundesländern[48] stellt der Bund bis zu 45 Mio. Euro für das Projekt »Additiv-Generative Fertigung – Die 3D-Revolution zur Produktherstellung im Digitalzeitalter AGENT 3D« zur Verfügung (Laufzeit: 2013–2020). Das Projektbudget soll durch Industriebeteiligungen um weitere 45 Mio. Euro anwachsen, wo-

47 Eine tabellarische Übersicht aller von 2003 bis 2013 geförderten Forschungsvorhaben findet sich in Bundesregierung (2013b, S. 15 ff.).

48 www.bmbf.de/de/foerderprogramm-zwanzig20-partnerschaft-fuer-innovation-startet-639.html (23.12.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

durch es zu Europas größtem Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Bereich der additiven Fertigung würde. Ziele sind u.a., Potenziale der additiven Fertigung auszuloten und bestehende technologische und wirtschaftliche Grenzen zu überwinden (Fraunhofer IWS 2016).

- Seit 2013 wird der Forschungscampus Digital Photonic Production (DPP) im Cluster Photonik an der RWTH Aachen für insgesamt 15 Jahre mit bis zu 30 Mio. Euro durch die Förderinitiative »Forschungscampus – öffentlich-private Partnerschaft für Innovation« des BMBF unterstützt. Erforscht werden neue Methoden für die Nutzung von Licht als Werkzeug in der Produktion der Zukunft, insbesondere für additive Fertigungsverfahren.[49]
- KMU können über die BMBF-Förderlinien »KMU innovativ: Produktionsforschung« und »KMU innovativ: Materialforschung« Forschungs- und Entwicklungsprojekte zur additiven Fertigung durchführen.

Im Jahresgutachten 2015 hat die Expertenkommission Forschung und Innovation empfohlen, die Fördermaßnahmen im Bereich der additiven Fertigung in einen stringenten Gesamtrahmen einzubetten, da diese bis dato »vereinzelt und unsystematisch« angeboten würden (EFI 2015, S. 17). Kurz danach veröffentlichte das BMBF mit der Förderrichtlinie »Additive Fertigung – Individualisierte Produkte, komplexe Massenprodukte, innovative Materialien (ProMat_3D)« erstmals eine spezifische Fördermaßnahme zur additiven Fertigung, die Forschungs- und Entwicklungsaufwendungen im Rahmen industriegeführter vorwettbewerblicher Verbundprojekte unterstützt. Schwerpunkte bilden die Produktionsforschung (neue Methoden und Werkzeuge der Produktentwicklung und -fertigung) sowie die Materialforschung (neue oder entscheidend verbesserte Materialien für die additive Fertigung), die jeweils unter Berücksichtigung der gesamten Wertschöpfungskette bearbeitet werden sollen.[50] Dazu wurden bis Mitte 2016 die ersten 22 Verbundvorhaben mit einem Fördervolumen von 41 Mio. Euro ausgewählt.[51] Tabelle IV.2 zeigt eine Auswahl bereits angelaufener Forschungsvorhaben mit den jeweiligen Fördersummen und Laufzeiten (Stand Dezember 2016).

Auch das BMWi hat seit 2015 mehrere größere Forschungsvorhaben zur additiven Fertigung gestartet, zum Beispiel:

- In der 2015 veröffentlichten Fördermaßnahme »Digitale Technologien für die Wirtschaft (PAiCE)« steht die additive Fertigung zwar nicht alleine im Fokus, sie wird allerdings zu den »3-D-Technologien« gezählt, deren Anwendung ein wichtiges Element in der Digitalisierung sei. Gefördert wird

49 http://dpp.rwth-campus.com (23.12.2016)
50 www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-1037.html (23.12.2016)
51 https://www.bmbf.de/de/eroeffnung-des-bmbf-kongresses-produktionsforschung-2016-3065.html (23.12.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

die Entwicklung von Systemen und Diensten, die entlang der Wertschöpfungskette 3-D-Technologien integrieren (nicht aber Grundlagenforschung zu additiven Fertigungsverfahren) (BMWi 2015, S. 4 u. 7).

› Das Verbundprojekt »M3D – Mobile 3D-Erfassung und 3D-Druck für industrielle Anwendungen« hat eine Fördersumme von 3,45 Mio. Euro (Laufzeit: 2016–2018). Hier soll die gesamte Prozesskette der industriellen additiven Fertigung untersucht und optimiert werden.

› Das Verbundvorhaben »SAMPL – Secure Additive Manufacturing Platform« lief im November 2016 an (Laufzeit: bis 2019) und wird mit 2,6 Mio. Euro unterstützt. Ziel ist die Entwicklung einer durchgängigen Sicherheitslösung für additive Fertigungsverfahren.

Tab. IV.2 Aktuelle Forschungsvorhaben des BMBF (Auswahl)

Thema	Laufzeit	Fördersumme
Verbundprojekt: Erforschung einer offenen 3-D-Druck Plattform zur schnellen Herstellung hybrider, biokompatibler Bauteile (OpenBioPrint)	Juni 2016 bis Mai 2019	0,7 Mio. Euro
Verbundprojekt: Additive Sandwich Manufacturing – Innovative Prozesskette zur Herstellung faserverstärkter Funktionsbauteile auf Basis von Sandwichstrukturen mittels additiver Fertigung (ASM)	Oktober 2016 bis September 2019	2,2 Mio. Euro
Verbundprojekt: Additive Fertigung von Multimaterial-Hybridbauteilen (MultiMat3D)	Oktober 2016 bis September 2019	1,7 Mio. Euro
Verbundprojekt: Additive Fertigungsprozesse für komplexe Produkte in variantenreicher und hochfunktionaler Stahlbauweise (StaVari)	Oktober 2016 bis September 2019	2,2 Mio. Euro
Verbundprojekt: Bauteilindividuelle Prozesssteuerung und -überwachung zur anforderungsgerechten additiven Massenproduktion (IndiPro)	November 2016 bis Oktober 2019	1,9 Mio. Euro

Quelle: Förderkatalog des Bundes (23.12.2016)

Insgesamt gesehen ist Deutschland im internationalen Vergleich gut aufgestellt, was die staatliche Forschungs- und Entwicklungsförderung im Bereich der additiven Fertigung angeht, insbesondere seit der Intensivierung der Projektförderung durch den Bund ab 2015. Die Förderung ist stark technologieorientiert (Weiterentwicklung von Verfahren, Materialien, Prozessketten), während die wirtschafts- und sozialwissenschaftliche (Begleit-)Forschung zu möglichen Auswirkungen und Folgen der additiven Fertigung bisher von nachrangiger Bedeutung ist (dazu Kap. V).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Betrachtung von Entwicklungsperspektiven mittels Publikations- und Patentanalysen 1.4

Internationale Publikations- und Patentanalysen im Bereich der Technologieentwicklung erlauben

- tiefergehende strukturelle Analysen hinsichtlich der Entwicklungsdynamik und Reife von Technologien,
- Ländervergleiche und Akteursanalysen,
- Branchenvergleiche und Aussagen zur Dynamik
- sowie Hinweise auf mögliche Spezialisierungen.

Im Folgenden werden in knapper Form die Ergebnisse einer internationalen Publikations- und Patentanalyse zur additiven Fertigung dargestellt. Diese wurden im Rahmen des Gutachtens durch das Fraunhofer ISI (2016, S. 68 ff.) durchgeführt, wobei eine bereits erprobte Methodik zur Anwendung gelangte (Kasten). Das Hauptaugenmerk richtete sich auf das produzierende Gewerbe (Maschinen- und Anlagenbau, Werkzeug- und Formenbau, Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrtindustrie, Rüstungsindustrie, Elektronik, Medizintechnik etc.).

Methodik der Publikations- und Patentanalysen

Die *Publikationsanalysen* wurden auf der Basis des Science Citation Index Expanded (SCIE, enthält etwa 8.000 Zeitschriften, welche ca. 150 Disziplinen zugeordnet werden können) sowie des Social Sciences Citation Index (SSCI, mehr als 3.000 Zeitschriften aus über 50 verschiedenen sozialwissenschaftlichen Disziplinen) durchgeführt.[52] Die Suchstrategie für Publikationsanalysen setzt sich aus allgemeinen Stichwörtern wie 3-D-Printing, Additive/Rapid/Generative, Manufacturing/Prototyping/Tooling etc. in Ergänzung mit einschlägigen Verfahren wie Selective Laser Sintering/Melting, Stereolithografie etc. zusammen, die auf Zeitschriften im Bereich der additiven Fertigung angewandt werden. Hierdurch werden Publikationsaktivitäten sowohl von Herstellern/Anbietern als auch von Nutzern/Anwendern von Verfahren der additiven Fertigung bzw. des 3-D-Drucks erfasst. Es ergaben sich für den Zeitraum von 1990 bis 2015 insgesamt rund 25.600 Treffer, wobei die Zahl der Publikationen in den letzten Jahren sehr dynamisch angestiegen ist: von rund 100 im Jahr 1990 auf etwa 3.000 im Jahr 2015.

52 Diese sind Teile des Web of Science (WoS), das eine multidisziplinäre Datenbank mit breiter fachlicher Abdeckung darstellt (https://webofknowledge.com [16.02.2016]).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Eine vergleichbare Suchstrategie wurde bei den *Patentanalysen* angewandt: Grundlage bildete die Patentdatenbank PATSTAT des Europäischen Patentamtes,[53] die im Wesentlichen bibliografische Angaben zu Patentanmeldungen an über 80 Patentämtern weltweit beinhaltet. Diese wird halbjährlich aktualisiert. Für die hier durchgeführte Analyse wurde der Datenbankauszug aus dem April 2015 verwendet. Das aktuellste vollständige Jahr war 2012 (Veröffentlichung 18 Monate nach Prioritätsdatum), denn Patente in dieser Analyse werden nach ihrem Jahr der weltweit ersten Anmeldung gezählt, allgemein als das Prioritätsjahr bekannt. Die zuvor genannten allgemeinen Stichwörter und einschlägigen Verfahren wurden als Suchbegriffe verwendet. Die International Patent Classification (IPC) wurde nur im Einzelfall und falls eindeutig zuordenbar hinzugenommen (z.B. für Stereolithografie). Damit ergaben sich für den Zeitraum von 1990 bis 2012 etwa 2.500 Treffer. Die jährlichen Patentanmeldungen stiegen in diesem Zeitraum um das 10-Fache: von rund 30 im Jahr 1990 auf 300 im Jahr 2012.

Mit den so gewonnenen Publikations- und Patentdaten wurden mittels Zeitreihenanalysen die Entwicklungsdynamik und der Reifegrad von Forschung und Entwicklung untersucht. Es wurden Ländervergleiche und Akteursanalysen durchgeführt, um publizierende Organisationen und Patentanmelder zu identifizieren und zu typisieren. Außerdem wurden die identifizierten Publikationen mittels Subjektkategorien sowie die Patente mittels der IPC-Klassen[54] bestimmten Branchen zugeordnet, um so Branchenanalysen durchführen zu können.

Entwicklungsdynamik und Reife additiver Technologien

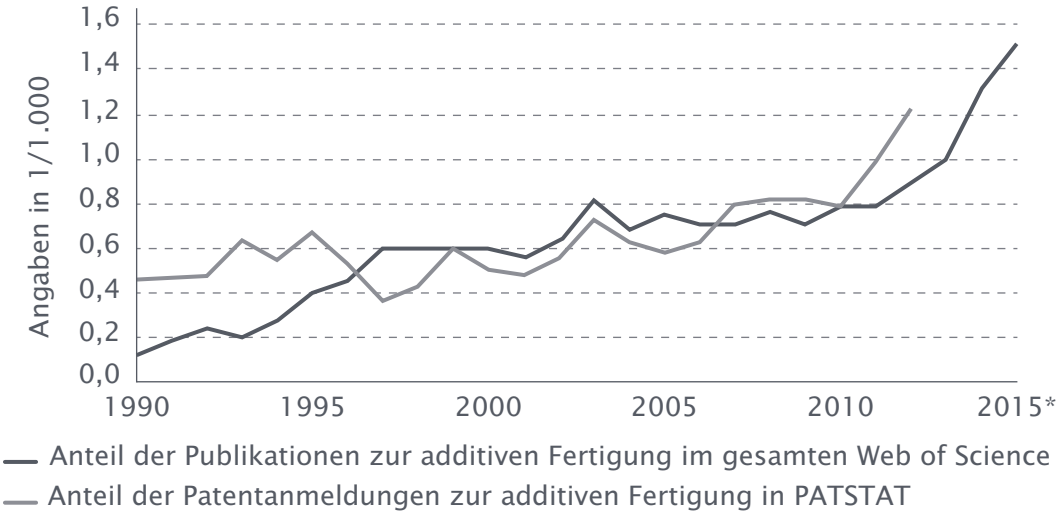
Die Publikationsanalyse zur additiven Fertigung zeigt über die letzten 25 Jahre einen dynamischen Anstieg der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, mit einer vorübergehenden Sättigungsphase (Plateau) zwischen 1997 und 2001, gefolgt von einem erneuten Anstieg mit besonderer Dynamik ab 2011 (Abb. IV.5). Publikations- und Patententwicklungen verlaufen praktisch parallel, was darauf hindeutet, dass wissenschaftliche und technologische Forschungsergebnisse sehr anwendungsnah transferiert und in eine Kommerzialisierung überführt werden.

53 www.epo.org/searching-for-patents/business/patstat.html (16.2.2016)

54 Mittels IPC-Codes wurden in der Datenbank PATSTAT alle Patente bestimmten technologischen Themen zugeordnet. Diese wurden anhand einer Konkordanztabelle den entsprechenden Branchen zugewiesen.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abb. IV.5 Publikations- und Patentdynamik



* Werte für 2015 hochgerechnet

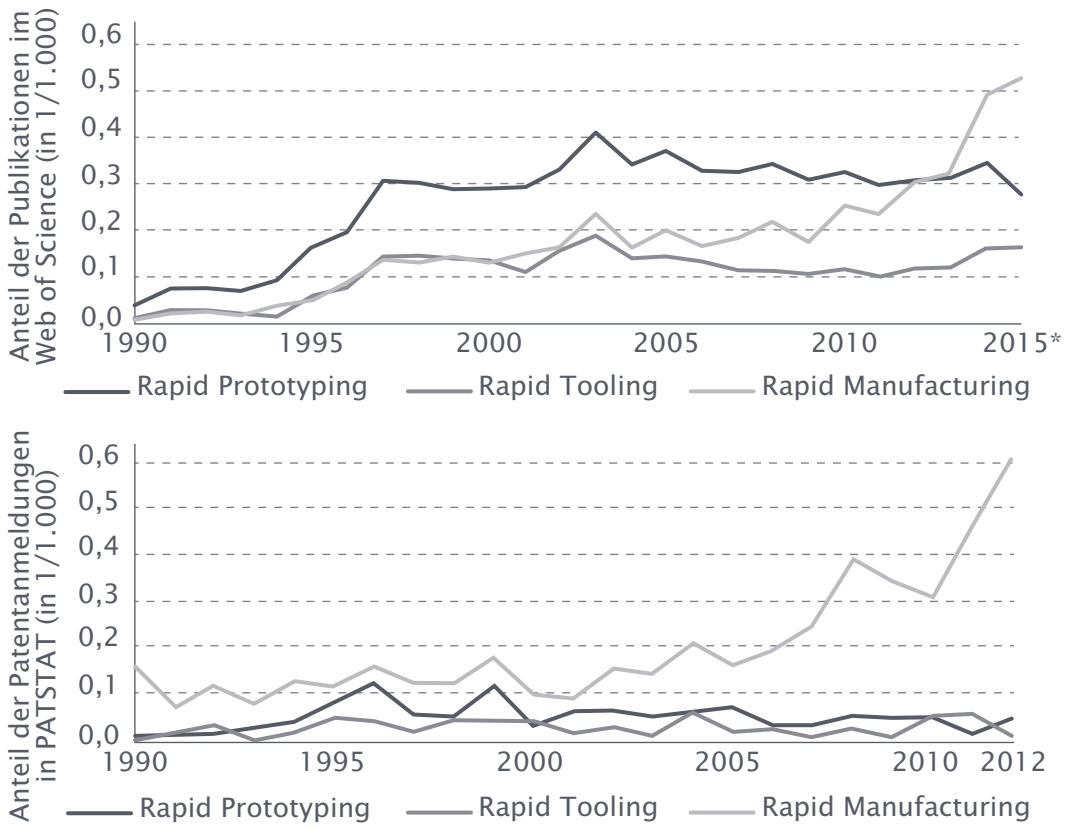
Quelle: nach Fraunhofer ISI 2016, S. 80

Eine Differenzierung nach Rapid Prototyping, Rapid Tooling und Rapid Manufacturing zeigt die Abbildung IV.6 (rechts für Publikationen, links für Patente). Die Sättigungsphase um 2000 ist wesentlich auf das Erreichen eines hohen Reifegrades in der Entwicklung des Rapid Prototyping, aber auch des Rapid Tooling zurückzuführen, denn Publikationen und Patentanmeldungen zeigen für diese Einsatzgebiete der additiven Fertigung seitdem eine weniger dynamische bzw. rückläufige Entwicklung (der seit 2012 leicht positive Trend in den Publikationsdaten beim Rapid Tooling ist möglicherweise mit neuen Werkstoffen zu erklären). Der extrem dynamische Anstieg der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten der letzten Jahre bei der additiven Fertigung insgesamt ist also unübersehbar auf das Rapid Manufacturing zurückzuführen.

Insgesamt ergibt sich ein mit den Marktentwicklungen konsistentes Bild: Für den Einsatz im Bereich Prototypenbau ist die technologische Reife der hier verwendeten additiven Fertigungsverfahren sehr hoch, die Anwendungspotenziale sind bereits gut bekannt bzw. auch schon ausgeschöpft. Für den Werkzeugbau ist die technologische Reife ebenfalls sehr hoch, es gibt aber weiterhin Anwendungspotenziale zu erschließen. Für das Rapid Manufacturing, also die (serielle) Herstellung von Endprodukten, weisen die jüngsten sehr dynamischen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten hingegen auf ein noch hohes Potenzial hin, welches in Analogie zu den Entwicklungen des Rapid Prototyping daher in den kommenden 10 bis 20 Jahren zu einer Ausreifung der Verfahren und Anwendungen führen dürfte.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abb. IV.6 Publikations- (oben) und Patentdynamik (unten) differenziert nach Einsatzgebiet



* Werte für 2015 hochgerechnet

Quelle: nach Fraunhofer ISI 2016, S. 80

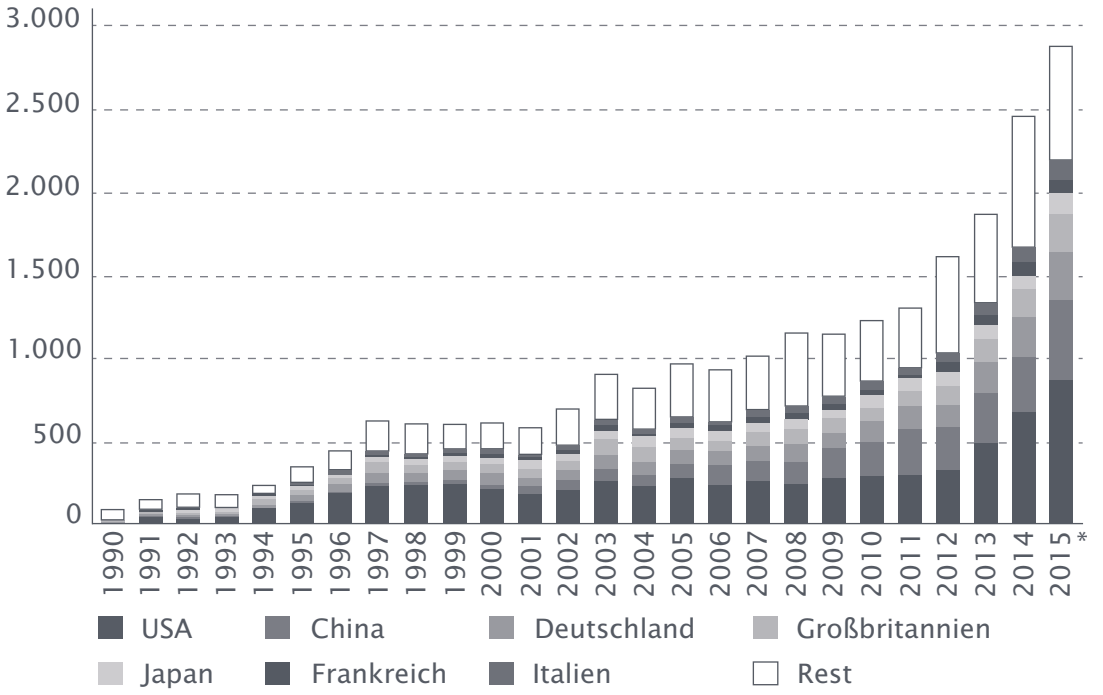
Ländervergleiche und Akteursanalysen

Die Anteile der Länder an Publikationen zwischen 1990 und 2015 (Abb. IV.7) zeigen, dass die USA über den gesamten Zeitraum mit einem Anteil von aktuell rund 30 % ein zentraler Forschungs- und Entwicklungsakteur im Feld der additiven Fertigung sind, gefolgt von China mit einem Anteil von etwa 16 % (2015), Deutschland und Großbritannien mit jeweils rund 7 bis 10 %. Japan, Frankreich und Italien zählen zu den weiteren wichtigen Akteuren mit jedoch maximal 5 % des Anteils an Publikationen. Betrachtet man den Anteil aller Länder der Europäischen Union, so liegt dieser zusammengenommen auf einer vergleichbaren Ebene mit den USA. Eine Verbreiterung der Akteure zeigt sich durch die zunehmende Zahl der Publikationen von Ländern jenseits der führenden sieben Länder. Für Deutschland ergibt sich über die Jahre durchweg ein stabiler gleichbleibender Anteil.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Von allen führenden Akteuren weist China in den letzten 15 Jahren das mit Abstand größte Wachstum der Publikationszahlen auf: Diese sind um das 20-Fache gestiegen, wohingegen in den USA, Deutschland und Großbritannien 2015 jeweils etwa 4-mal so viel publiziert wurde wie im Jahr 2000.

Abb. IV.7 Publikationsdynamik mit Länderverteilung

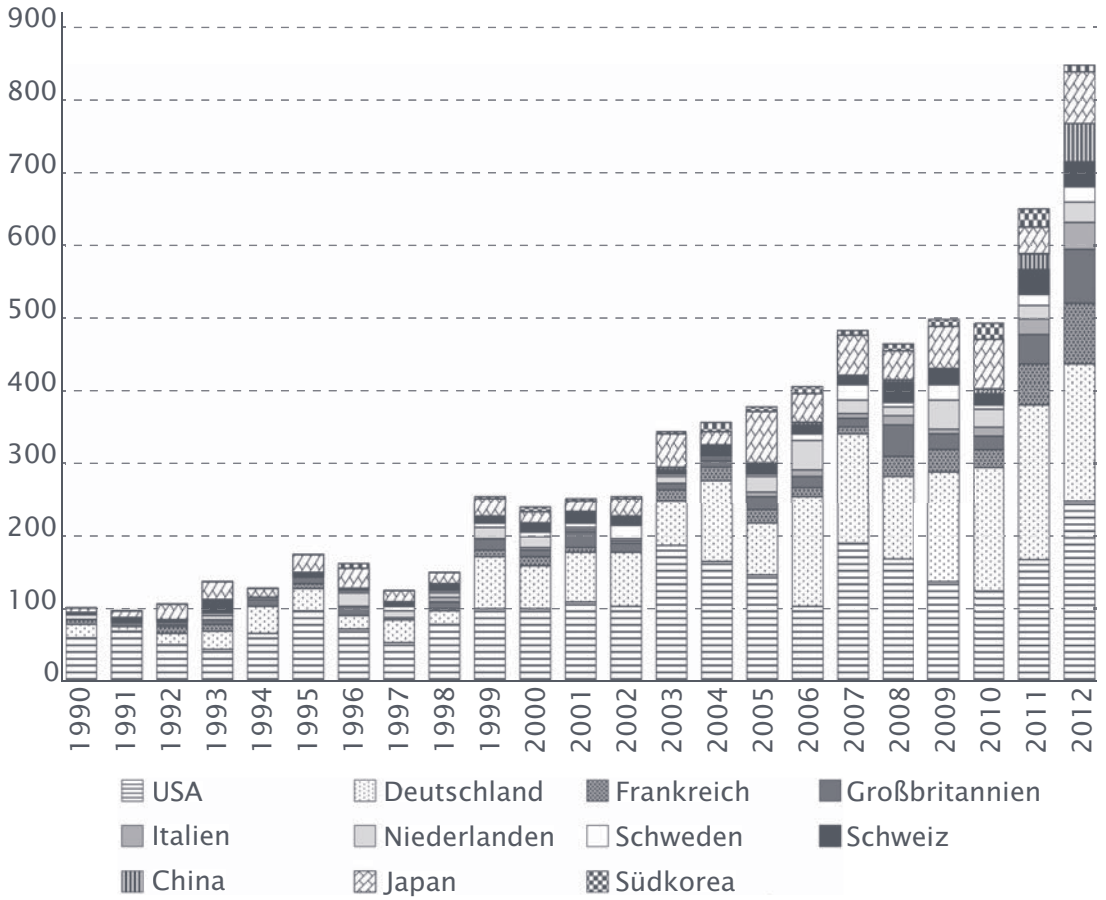


Startwert im Jahr 1990 normiert auf 100; * Werte für 2015 hochgerechnet
Quelle: Fraunhofer ISI 2016, S. 83

Die Patentdynamik (Abb. IV.8) zeigt den anfänglich besonders hohen, im Zeitverlauf aber rückläufigen Anteil der USA, welcher von durchschnittlich 50 % in den 1990er Jahren auf derzeit 30 % gefallen ist. Der Anteil Deutschlands hat sich auf dem Niveau von ebenfalls etwa 30 % stabilisiert. Japan ist drittstärkster Akteur. Unter den weiteren Patentanmeldungen finden sich Akteure aus denselben Ländern, die auch bei den Publikationen führend sind, d. h. Großbritannien, Frankreich und Italien. Der Trend der jüngsten Vergangenheit lässt auf eine zunehmende Aktivität insbesondere im asiatischen Raum (China, Südkorea und weiterhin Japan) schließen.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abb. IV.8 Patentdynamik mit Länderverteilung



Startwert im Jahr 1990 normiert auf 100
Quelle: Fraunhofer ISI 2016, S. 85

Auf der Akteursseite zeigt sich bei den Patentanmeldungen eine hohe Konzentration auf wenige Unternehmen. Etwas über 30 Unternehmen sind weltweit für fast 40 % der Patente verantwortlich (Tab. IV.2). Darunter befinden sich sowohl Großunternehmen (über 1.000 Mitarbeiter) als auch KMU (weniger als 1.000 Mitarbeiter). Beachtlich ist auch die führende Rolle der anwendungsnahen Forschung (z.B. Fraunhofer in Deutschland, TNO in den Niederlanden) mit hohen Patentanteilen. Deutschland ist im internationalen Vergleich vor allem stark bei der Entwicklung von industriellen additiven Fertigungsverfahren, insbesondere im Bereich der metallbasierten Verfahren. Mittelständische Unternehmen wie EOS Electro Optical Systems oder Voxeljet zählen hier zu den weltweit führenden Akteuren. Diese beiden zusammen halten einen Anteil von 5 % an den weltweiten Patentaktivitäten. Demgegenüber ist beispielsweise in China eine hohe Akteursdiversifizierung festzustellen, ebenso in Japan und Südkorea, obwohl hier eher eine Akteurskonzentration durch große Konglomerate hätte erwartet werden können.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Tab. IV.2 Die 30 führenden Patentanmelder im Bereich der additiven Fertigung (2003–2012)

Anmelderland	Anmelder	Typ	Patentanteil in %
DE	EOS Electro Optical Systems	KMU	3,4
DE	Evonik Degussa	GU	2,7
US	3D Systems	GU	3,2
DE	MTU Aero Engines	GU	2,5
US	Hewlett Packard Development Company	GU	2,4
DE	Siemens	GU	2,1
NL	TNO	FuE	1,9
US	Stratasys	GU	1,7
DE	Fraunhofer	FuE	1,4
DE	Voxeljet AG	KMU	1,4
IL	Objet Geometries	KMU	1,2
NL	DSM IP Assets	GU	1,1
US	The Boeing Company	GU	1,1
US	General Electric Company	GU	1,0
SE	ARCAM	KMU	0,9
US	Nike International	GU	0,9
GB	BAE Systems	GU	0,8
JP	Panasonic Electric Works Company	GU	0,8
IT	DWS	KMU	0,8
US	E.I. Du Pont de Nemours & Company	GU	0,7
US	Eastman Kodak Company	GU	0,7
CH	Michelin Recherche et Technique	GU	0,7
JP	Mimaki Engineering Company	GU	0,7
US	Z Corporation (heute 3D Sytems)	GU	0,7
DE	EADS Deutschland	GU	0,6
JP	Fujifilm Corporation	GU	0,6
DE	BEGO Medical	KMU	0,6
DE	EnvisionTEC	KMU	0,6
LI	Ivoclar Vivadent	GU	0,6
US	Pratt & Whitney Rocketdyne	GU	0,6
FR	SNECMA	GU	0,6
US	United Technologies Corporation	GU	0,6
gesamt			39,6

FuE: Forschung und Entwicklung, GU: Großunternehmen

Quelle: Fraunhofer ISI 2016, S. 87

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Branchenfokus und Dynamik

Wie die Analyse beim Ländervergleich und hinsichtlich der Akteursgruppen gezeigt hat, stehen hinter den Publikations- und Patentaktivitäten sowohl Hersteller, also Anbieter der Technologie, als auch Anwender von additiven Fertigungsverfahren. Um diese systematischer zu unterscheiden und die Aktivitäten differenziert nach Anwendungsfeldern zu analysieren, wurden Branchenanalysen durchgeführt. Die relative Größe bzw. Intensität der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten kann über Branchenvergleiche und die Dynamik (Wachstum) über Zeitreihenanalysen ermittelt werden.

Den Fokus der Analyse bildeten die in Tabelle IV.3 aufgeführten Branchen. Dabei wurde differenziert nach Branchen, die sowohl durch Anbieter bzw. Hersteller als auch durch Anwender bzw. Nutzer der additiven Fertigung geprägt sind, und nach eher reinen Anwender- bzw. Nutzerbranchen. Einige der in der Tabelle genannten Branchen wurden weiter differenziert, z.B. der Transportsektor in Kraftfahrzeuge und Luft- und Raumfahrt. Schließlich wurden aufgrund des stärkeren Bezugs zur Grundlagenforschung die Disziplinen Physik, Optik und Biologie, aber beispielsweise auch das Anwendungsfeld Architektur separat betrachtet.

Tab. IV.3 Anbieter- und Anwenderbranchen der additiven Fertigung

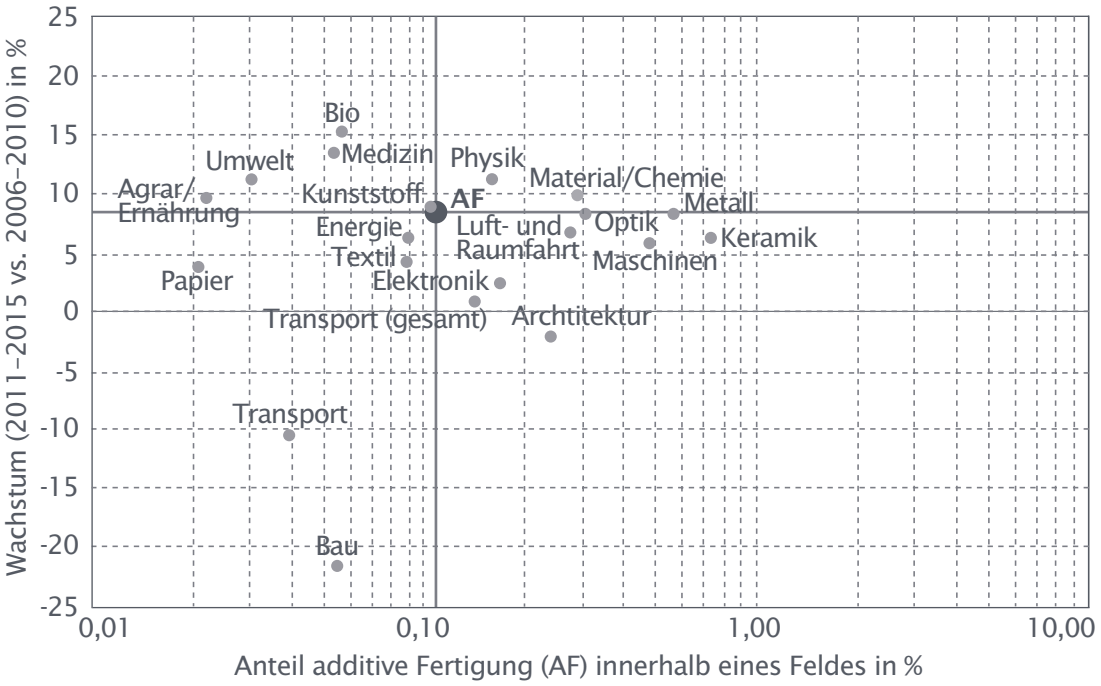
sowohl durch Anbieter bzw. Hersteller als auch durch Anwender bzw. Nutzer geprägte Branchen	tendenziell reine Anwender- bzw. Nutzerbranchen
› Metalle und Metallwaren	› Transport
› Gummi- und Kunststoffprodukte	› Energietechnik
› Glas, Keramik	› Baustoffe/Bau
› Chemikalien, Chemieerzeugnisse	› Elektrogeräte/Elektronik
› Maschinen, Anlagen, Ausrüstung	› Landwirtschaft, Nahrungsmittel,
	› Getränke, Tabak
	› Pharmaindustrie/Medizintechnik
	› Möbel, Haushaltswaren,
	› Büroausstattung
	› Textilien und Leder
	› Papier, Holz

Quelle: Fraunhofer ISI 2016, S. 74 f.

Abbildung IV.9 zeigt den relativen Anteil der weltweiten Publikationen zur additiven Fertigung innerhalb einer Branche (1 % hieße 1 von 100 Publikationen einer Branche beschäftigen sich mit additiver Fertigung) gegenüber der Dynamik (mittleres Jahreswachstum über zwei Zeiträume der letzten 10 Jahre, 2011–

2015 gegenüber 2006–2010). Um die Dynamiken in einzelnen Ländern einander gegenüberzustellen, wurde dies in den Abbildungen IV.10 bis IV.12 für die Publikationen der USA, Deutschlands und Chinas (als die führenden Länder im Bereich der Publikationen) wiederholt. Dies kann als eine Art Portfolioanalyse aufgefasst werden, wobei hohe Anteile und hohe Dynamiken (in den Abbildungen der Quadrant oben rechts) auf Branchen hinweisen, in welchen das Thema großen Raum einnimmt und etabliert ist. Kleine Anteile und hohe Dynamiken (oben links) weisen auf attraktive Zukunftsbranchen hin. Geringe oder abnehmende Dynamiken können bedeuten, dass sich das Thema weniger durchsetzt bzw. an Bedeutung verliert (unten links und rechts).

Abb. IV.9 Anteil und Dynamik der Publikationen nach Branchen (Welt)



Quelle: Fraunhofer ISI 2016, S. 96

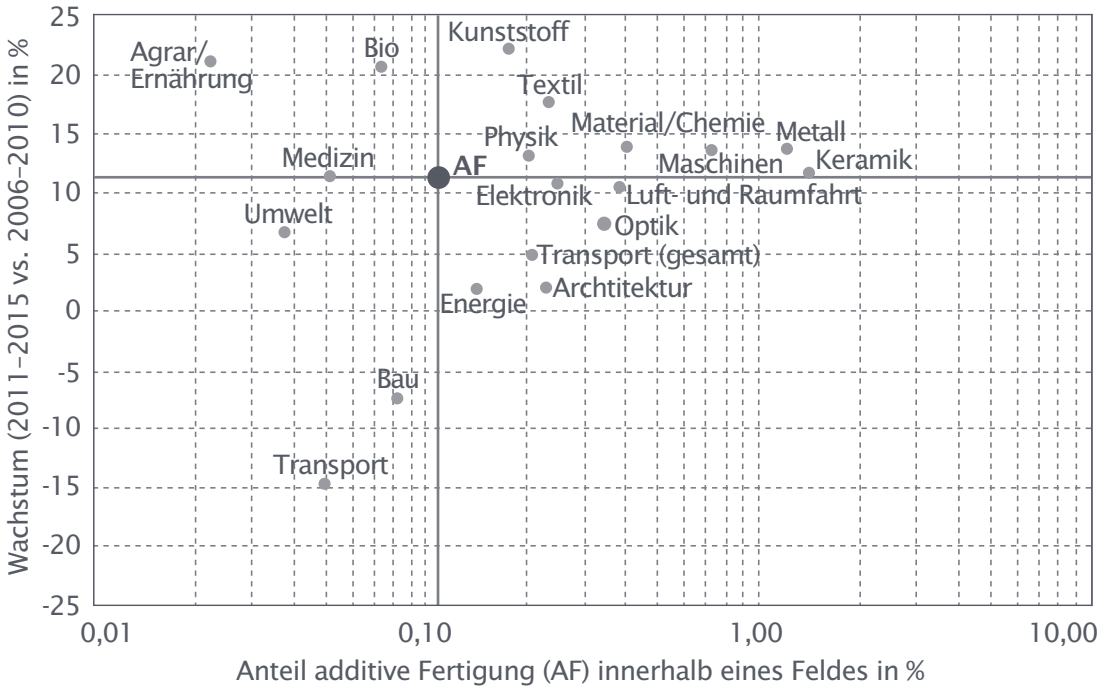
Für weltweite Publikationen zur additiven Fertigung zeigt die Branchenanalyse (Abb. IV.9) eine relativ hohe Bedeutung des Themas im Maschinenbau bzw. in der Ingenieurtechnik sowie den materialwissenschaftlichen Bereichen Metall, Keramik, Kunststoff, aber auch in den Disziplinen Optik und Physik bei typischen Wachstumsraten von 5 bis 10 % und mehr. Dies repräsentieren tendenziell eher die Anbieterbranchen, zu einem kleineren Teil könnten aber auch Anwenderbranchen vertreten sein. In Anwendungsfeldern wie der Luft- und Raumfahrt (mehr als 5 % Wachstum) und der Architektur (negatives Wachstum), aber auch der Elektronik und dem Transportbereich befassen sich 1 bis 3

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

von 1.000 Publikationen mit dem Thema. In allen weiteren Anwenderbranchen befasst sich weniger als 1 von 1.000 Publikationen mit additiver Fertigung, jedoch können für die Bereiche Biologie/Medizin, Umwelt, Agrarwesen/Ernährung hohe Wachstumsraten (über 10 %) konstatiert werden.

Für die USA ändert sich dieses Bild insofern, als dass sich höhere Anteile und Wachstumsraten in den Bereichen Kunststoff und Textilien zeigen und ein insgesamt großer Teil der Anwendungsfelder mit höheren Anteilen und höherer Dynamik (bis 20 % und mehr) oberhalb des durchschnittlichen Anteils der gesamten Publikationen zur additiven Fertigung liegt (Abb. IV.10). Es zeigt sich also ein deutlich größerer Fokus auf die Anwendungen der additiven Fertigung.

Abb. IV.10 Anteil und Dynamik der Publikationen nach Branchen (USA)

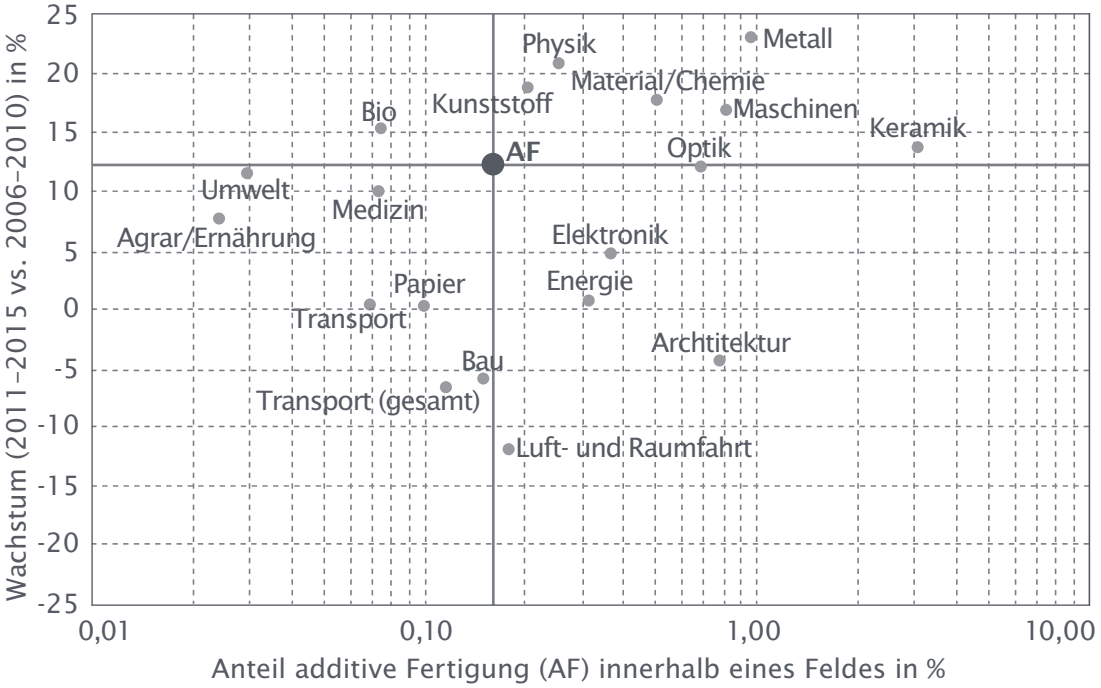


Quelle: Fraunhofer ISI 2016, S. 97

Für Deutschland (Abb. IV.11) ergibt sich ein sehr diverses Bild: Alle anbieter- bzw. herstellerbezogenen Felder (Maschinenbau, Materialwesen/Chemie, Keramik, Metall, Kunststoff, Optik, Physik) liegen oberhalb des Durchschnitts mit hoher relativer Bedeutung nach Anteilen und Dynamik. Alle Anwenderbranchen haben einen hohen Anteil, aber eine geringe Dynamik (z.B. Architektur, Energie, Elektronik, Luft- und Raumfahrt) oder einen geringen Anteil und eine etwas höhere Dynamik (die anderen Felder). Für Deutschland zeigt sich also ein klarer Fokus auf die Anbieter- und Herstellerseite und keine klare Diffusion in die Anwendungsfelder.

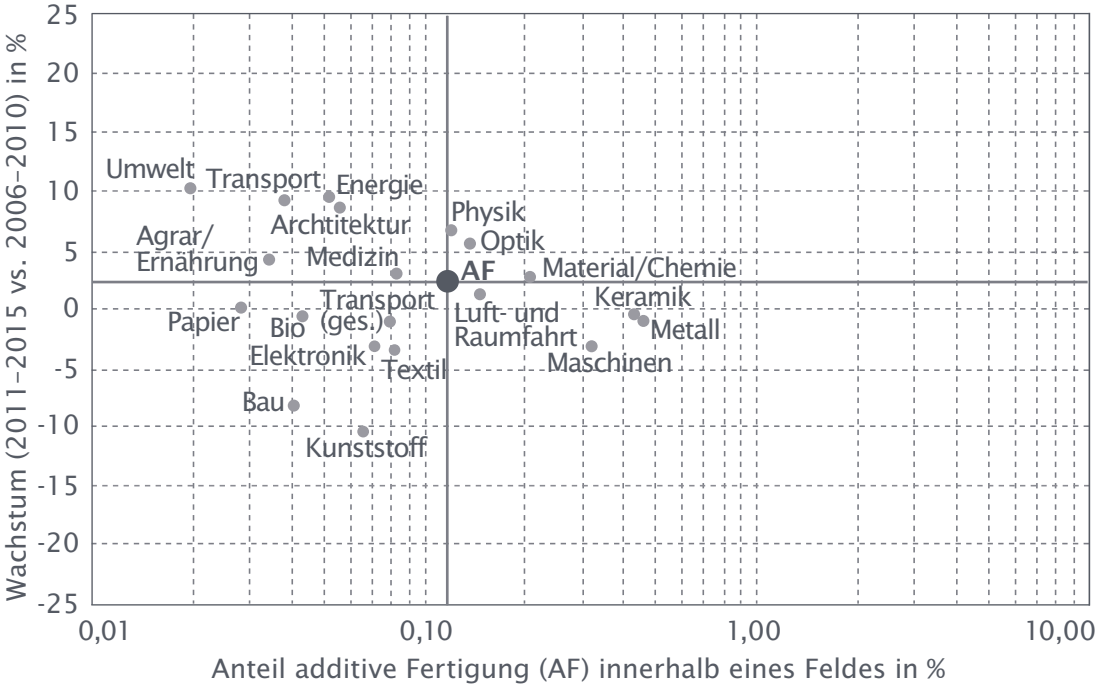
Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abb. IV.11 Anteil und Dynamik der Publikationen nach Branchen (Deutschland)



Quelle: Fraunhofer ISI 2016, S. 97

Abb. IV.12 Anteil und Dynamik der Publikationen nach Branchen (China)



Quelle: Fraunhofer ISI 2016, S. 98

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

In China (Abb. IV.12) sind generell geringere bzw. verhaltene Wachstumsraten und insgesamt geringere Anteile der Publikationen innerhalb der Branchen zu beobachten. Dabei fallen die vergleichsweise höhere Bedeutung des Bereichs Metalle sowie die höhere Dynamik in den Anwendungsfeldern Energie, Architektur und Transport auf.

Spezialisierung

Für einen Vergleich der Aktivitäten der zentralen Länder im Bereich einzelner Anwenderbranchen der additiven Fertigung bietet sich der Relative Patentanteil (Revealed Patent Advantage [RPA]) an. Dieser Indikator gibt an, ob sich ein Land im internationalen Vergleich in einem spezifischen Fachgebiet über- oder unterdurchschnittlich aktiv zeigt. Hierfür wird der Anteil aller Patente eines Landes in einem spezifischen Fachgebiet an den gesamten Patenten dieses Landes ins Verhältnis zum Anteil dieses Fachgebiets an den weltweiten Patenten gesetzt. Bei einem Wert von null entspricht die Aktivität dem internationalen Durchschnitt, -100 bedeutet eine verschwindend geringe Aktivität, wohingegen 100 auf eine extrem starke Spezialisierung in der entsprechenden Branche hinweist.

In Abbildung IV.13 ist dieser Indikator für eine Reihe von Branchen für Deutschland und die USA jeweils kumuliert für die 5-Jahres-Zeiträume 2003 bis 2007 sowie 2008 bis 2012 dargestellt. Die Spezialisierung Deutschlands zeigt sich in den Jahren 2008 bis 2012 besonders in den Branchen Metallverarbeitung, Maschinenbau (Herstellerseite) sowie Transport und Energietechnik (Anwenderseite). Demzufolge existiert ein starker Fokus auf wenige, aber klar definierte Hersteller- und Anwenderbranchen (Balken nach rechts in Abb. IV.13). Die Medizintechnik als Anwenderbranche hatte in Deutschland in früheren Jahren (2003 bis 2007) eine größere (relative) Bedeutung und fällt heute eher ab. Dies lässt auf einen höheren technologischen Reifegrad schließen; tatsächlich befindet sich die Medizintechnik bereits in einer ausgeprägten Diffusionsphase. In den USA zeigt die RPA-Analyse eine sehr starke Spezialisierung über viele Anwenderbranchen hinweg (Medizintechnik, Transport, Energietechnik, Bau, Textil etc.).

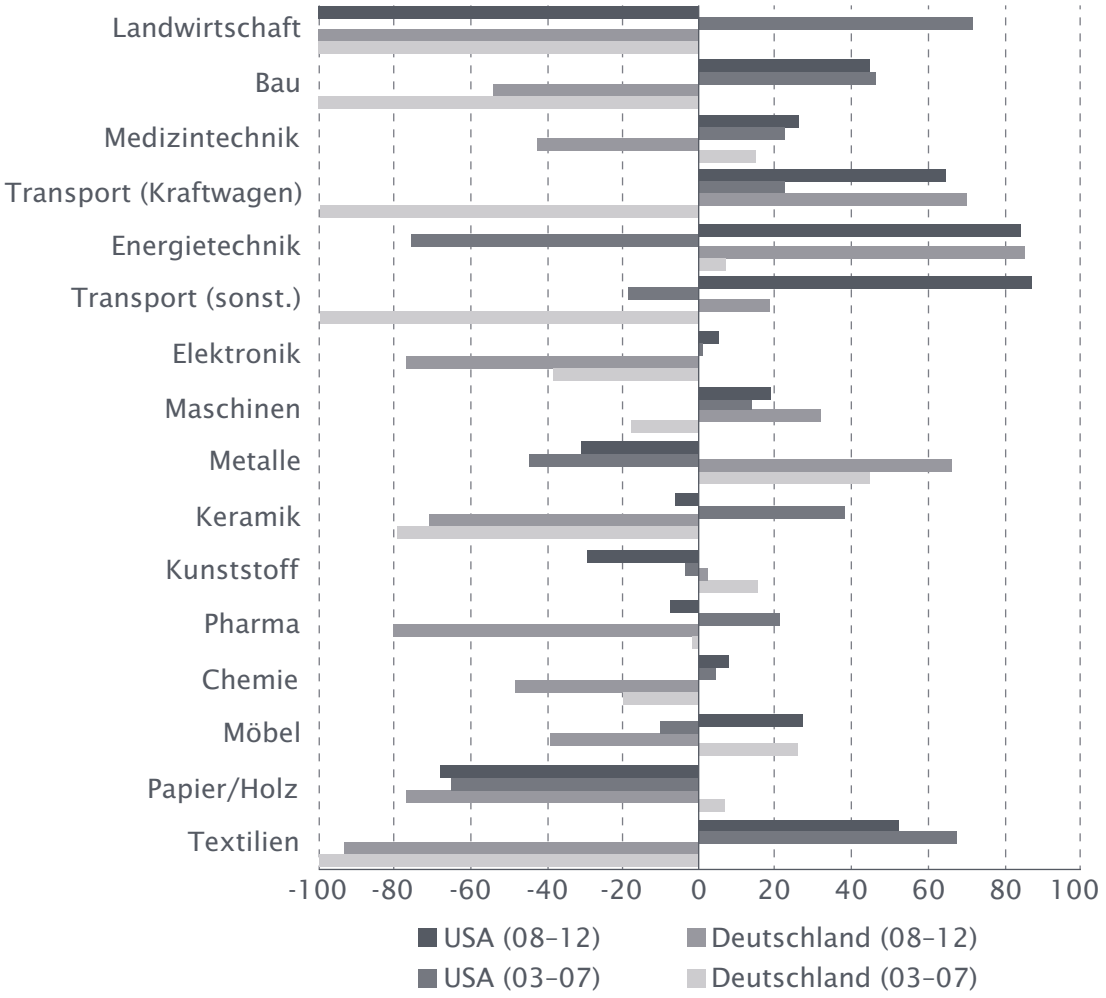
Kernergebnisse der Publikations- und Patentanalysen

Die zentralen Ergebnisse der Publikations- und Patentanalysen können wie folgt zusammengefasst werden:

› Seit 2011 steigt die Zahl der Publikationen zur additiven Fertigung stark an, vorwiegend getrieben von einem sehr dynamischen Anstieg im Bereich Rapid Manufacturing.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abb. IV.13 Spezialisierung Deutschlands und der USA nach Branchen



Quelle: Fraunhofer ISI 2016, S. 108

- Die zeitliche Entwicklung bei den Patentanmeldungen verläuft praktisch parallel dazu, was darauf hindeutet, dass Forschungsergebnisse schnell und anwendungsnah in kommerzielle Produkte und Dienstleistungen überführt werden.
- Im Ländervergleich zeigen sich die USA als zentraler Akteur im Bereich der additiven Fertigung. Bei den Publikationen beträgt der Anteil etwa ein Viertel des weltweiten Outputs, bei den Patenten etwa 30 %. Allerdings ist der Patentanteil derzeit rückläufig (er lag bei etwa 50 % in den 1990er Jahren).
- Deutschland hat einen starken und stabilen Anteil bei den Publikationen (etwa 7 bis 10 %), vor allem aber bei den Patenten (etwa 30 %).
- Aktuell machen sich verstärkte Aktivitäten im asiatischen Raum bemerkbar (besonders in China, aber auch in Südkorea und Japan).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

- Lediglich 30 Unternehmen und anwendungsnahe Forschungseinrichtungen sind weltweit für fast 40 % aller Patentanmeldungen verantwortlich.
- In Deutschland besteht ein starker Fokus auf wenige und klar definierte Hersteller- und Anwenderbranchen: Metallverarbeitung und Maschinenbau (Herstellerseite) sowie Transport und Energietechnik (Anwenderseite).
- In den USA ist besonders die Anwenderseite ausgeprägt, und zwar über viele Branchen hinweg: Medizintechnik, Transport, Energietechnik, Bau, Textil etc.

Entwicklungen, Potenziale und Hemmnisse für die Diffusion in die industrielle Praxis 2.

Die im Folgenden dargestellten, pointiert formulierten Thesen bauen einerseits auf den (zuvor dargestellten) Resultaten der Publikations- und Patentanalysen auf. Andererseits wurde durch das Gutachterteam des Fraunhofer ISI (2016, S. 109 ff.) eine Reihe von qualitativen Experteninterviews mit Fachleuten aus Wirtschaft, Wissenschaft sowie aus Verbänden und Organisationen geführt, um Praxis- und Erfahrungswissen in Bezug auf die Anwendung additiver Fertigungsverfahren in der industriellen Praxis zu erschließen (Anhang 4).

These 1

Additive Fertigungsverfahren stehen im Hinblick auf ihre Anwendung in der industriellen Serienproduktion (Rapid Manufacturing) in Deutschland erst am Beginn der Diffusionsphase.

Die Entwicklung additiver Fertigungsverfahren für die industrielle Serienproduktion (Rapid Manufacturing) als eigenständiger Anwendungsbereich nahm ihren Anfang Mitte der 2000er Jahre mit der Emanzipation der Verfahren vom additiven Werkzeugbau (Rapid Tooling). Seitdem zeigt Rapid Manufacturing eine dynamische Entwicklung in den Innovationsaktivitäten, und seit 2011 ist sowohl bei Patenten als auch bei Publikationen eine extreme Zunahme zu verzeichnen (Kap. IV.1.4). Die jüngsten Dynamiken in den Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten weisen auf ein noch hohes Entwicklungs- und Diffusionspotenzial für Rapid Manufacturing hin, welches – in Analogie zur Entwicklung beim additiven Prototypen- und Werkzeugbau – in den kommenden 10 bis 20 Jahren zu einer Ausreifung der Verfahren und Anwendungen führen dürfte.

Die Verortung von Rapid Manufacturing in einer frühen Diffusionsphase zeigt sich auch anhand der treibenden Akteure in Deutschland heute. Diese sind vor allem in der anwendungsnahen Forschung (z.B. Fraunhofer-Gesellschaft,

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Laser Zentrum Nord, RWTH Aachen, FAU Erlangen) sowie auf der Anwenderseite – konzentriert auf die Branchen Transport (Automobil, Luft- und Raumfahrt), Medizin- und Energietechnik – in größeren Unternehmen und Konzernen zu finden (These 3). Für Deutschland steht somit die Diffusion industrieller Anwendungen der additiven Fertigung in die Breite noch ganz am Anfang.

These 2

In den kommenden 10 Jahren ist nicht mit einer flächendeckenden Diffusion additiver Fertigungsverfahren in der deutschen Industrie zu rechnen.

Bei den konventionellen Fertigungsverfahren nimmt Deutschland im internationalen Wettbewerb eine Spitzenposition ein, teilweise sogar die Rolle des Technologieführers. In deutschen Unternehmen zeichnen sich die Prozesse und Verfahren der konventionellen industriellen Serienproduktion vor allem im Bereich der Mittel- und Großserie durch ein Höchstmaß an Effizienz aus. Die Bauteile und Komponenten werden kostenoptimiert hergestellt (die Herstellungskosten liegen teilweise im Eurocentbereich) und unterliegen seitens der Kunden höchsten Anforderungen an Qualität, Liefertreue und Wiederholgenauigkeit. In den letzten Jahren und Jahrzehnten wurden zudem viele konventionelle Fertigungslinien zu großen Teilen automatisiert, um dem steigenden Kostendruck im internationalen Wettbewerb standhalten zu können. Für diese Fertigungslinien wäre eine flächendeckende Substitution der konventionellen durch additive Fertigungsverfahren aus betriebswirtschaftlicher Sicht nicht zielführend, selbst für den Fall, dass die bestehenden technischen Herausforderungen der additiven Fertigungsverfahren (u.a. die langsame Prozessgeschwindigkeit) überwunden werden könnten. Die deutsche Technologieführerschaft bei den konventionellen Fertigungsverfahren erlaubt es, dass manche Bauteile mit komplexer Geometrie oder hoher Variantenvielfalt, die z.B. in den USA heute additiv gefertigt werden, hierzulande mit konventionellen Verfahren und den damit verbundenen Vorteilen realisiert werden können.

Im Hinblick auf die Entwicklung völlig neuer Produkte, die in ihrer Konstruktion und Auslegung für additive Fertigungsverfahren optimiert sind bzw. sich nur additiv fertigen lassen, steht die deutsche Industrie – abgesehen von ersten Anwendungsfeldern in der Luft- und Raumfahrt sowie der Medizintechnik – heute überwiegend noch am Anfang. Bis solche Produkte so zur Serienreife entwickelt sind, dass sie als Standardlösungen für viele Unternehmen in der Breite verfügbar sind, wird es nach Einschätzung von Experten noch viele Jahre dauern. Dies gilt gleichermaßen für internationale Wettbewerber, auch wenn in einigen Ländern, allen voran in den USA, die Anwenderseite im Kunststoff- und Konsumgüterbereich schon eine größere Breite aufweist.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

These 3

Deutschlands Stärke im internationalen Vergleich besteht vor allem auf der Entwickler- und Herstellerseite. Die Anwenderseite zeigt im internationalen Vergleich hingegen erhebliche Schwächen.

Die additive Fertigung in Deutschland ist durch eine mittelständisch geprägte und international führende Entwickler- und Herstellerseite im Bereich der Verfahren, Fertigungsanlagen und Materialien gekennzeichnet. Die Anwenderseite in Deutschland hingegen konzentriert sich auf einige wenige Großunternehmen (z.B. Siemens, MTU Aero Engines, EADS Deutschland, Automobilhersteller) und KMU innerhalb eines eher engen Branchenkreises in den Bereichen Transport (Automobil, Luft- und Raumfahrt), Medizin- und Energietechnik. In den USA ist die Anwenderseite dagegen erheblich breiter aufgestellt und durch eine hohe Vielfalt bei den Industrieakteuren charakterisiert. Hier reicht das Spektrum über die einschlägigen Großunternehmen (z.B. Boeing, General Electric, Nike, Pratt & Whitney, HP) hinaus und wird von einer Vielzahl von KMU mit hoher Diversifizierung in den Bereichen Transport, Medizin- und Energietechnik und weiteren Branchen (z.B. Konsumgüter) geprägt.

Deutschlands Technologieführerschaft bei den konventionellen Fertigungsverfahren kann einer stärkeren Diffusion der additiven Fertigung und Diversifizierung auch in andere Branchen (z.B. bei Konsum- und Verbrauchsgütern) entgegenstehen. Wo viele andere Länder bzw. Akteure aufgrund mangelnden bzw. weniger ausgeprägten Know-hows mit additiven Fertigungsverfahren neu ansetzen (meist auf niedrigerem Niveau), fertigen deutsche Unternehmen entsprechende Bauteile teilweise schon seit Jahren mit konventionellen Verfahren. Deutsche Akteure folgen offenbar einer klassischen Entwicklungs- und Diffusionsroute, die durch evolutionäre statt revolutionäre Schritte geprägt ist. Die Entwicklung völlig neuer, disruptiver Produkte und Geschäftsmodelle steht aus heutiger Sicht weniger im Fokus der Forschungs- und Entwicklungsbemühungen. Auch die in Deutschland führenden Anwenderbranchen der Luft- und Raumfahrt, Medizin- und Energietechnik fokussieren beim Einsatz additiver Fertigungsverfahren eher auf die Verbesserung und komplementäre Weiterentwicklung bestehender Produktdesigns und -lösungen.

Eine wichtige Rolle in der noch ausstehenden Diffusion der additiven Fertigung in breitere Anwendungsbereiche in Deutschland könnten Akteure der anwendungsnahen FuE einnehmen. Hierzulande wird das vorhandene Technologiewissen durch eine sehr breite und anwendungsnahe FuE- und Universitätslandschaft getragen, die deutlich vielfältiger ist als z.B. in den USA, wo eine hohe Konzentration der Aktivitäten innerhalb der Universitätslandschaft vorliegt. So nehmen in Deutschland im Bereich der additiven Fertigung Kooperationen

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

zwischen FuE-Einrichtungen bzw. Universitäten sowie KMU und Großunternehmen in den letzten Jahren deutlich zu, allerdings weiterhin mit einem engen Fokus auf die genannten Branchen Transport, Medizin- und Energietechnik. Die Initiative für Kooperationen geht dabei überwiegend von der anwendungsnahen Forschung aus.

These 4

Die Verarbeitung metallischer Werkstoffe verfügt über ein beachtliches Potenzial für den Aufbau eines Leitmarktes für die additive Fertigung in Deutschland.

Ein beachtliches Potenzial für die Stärkung der industriellen Anwenderseite in Deutschland über die bestehenden Branchen Transport, Medizin- und Energietechnik hinaus liegt in der stärkeren Nutzung bestehender und der Erschließung neuer Anwendungsbereiche von additiven Fertigungsverfahren zur Verarbeitung metallischer Werkstoffe. Bei der Entwicklung seriennaher additiver Fertigungsverfahren und -anlagen im Bereich Metalle ist Deutschland im internationalen Vergleich stark aufgestellt. Entsprechend spezialisierte mittelständische Unternehmen wie EOS, Voxeljet oder SLM Solutions zählen hier zu den weltweit führenden Akteuren. Im Unterschied dazu sind Unternehmen wie 3D Systems oder Stratasys aus den USA zentrale Akteure im Bereich kunststoffbasierter additiver Fertigungsverfahren, die vor allem im Konsum- und Privatanwenderbereich von großer Bedeutung sind.[55]

Sofern es hierbei um die evolutionäre Verbesserung bestehender Bauteile und Verfahren geht (z.B. auch durch die Kombination additiver und konventioneller Fertigungsverfahren), kann Deutschland sehr stark auf seinem bestehenden Leitmarkt für konventionelle Fertigungsverfahren aufbauen. Im Hinblick auf neuartige Konstruktions- und Bauteilmöglichkeiten (z.B. durch bionische Strukturen), die den Aufbau neuer Wissens- und Erfahrungsbestände erforderlich machen, wäre es allerdings wichtig, auch die Anwenderseite für metallische Verfahren im Inland zu verbreitern, da das neue Wissen eng an konkrete Problemstellungen und Einsatzszenarien der Kunden gebunden ist. Ein großes Potenzial für die Etablierung eines Leitmarkts im Bereich metallbasierter additiver Fertigungsverfahren (d.h. die Entwicklung einer gleichermaßen starken Entwickler- wie auch Anwenderbasis) sei, so einige Experten, in Deutschland durchaus gegeben.

55 Das soll keinesfalls dahingehend interpretiert werden, dass Deutschland bei kunststoffbasierten Verfahren auf der Entwicklerseite technologisch abgekoppelt wäre. Allerdings kommt diese Stärke anwenderseitig in Deutschland nicht in dem Maße zum Tragen, wie dies in den USA der Fall ist.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Es gilt jedoch, keine Zeit zu verlieren. So greift China in der Kombination von Maschinenbau und metallbasierten additiven Fertigungsverfahren bereits die Anwendungsbereiche Transport und Bau auf. Bei den chinesischen Forschungsaktivitäten zeigt sich im Unterschied zu Deutschland und den USA zudem ein breiteres Spektrum unterschiedlicher metallischer Ausgangsstoffe (neben Titan und Aluminium z.B. auch Kupfer und Nickel).

These 5

Die Diffusion additiver Fertigungsverfahren wird in Deutschland vor allem durch technische Prozessspezialisten mit Einzel- und Kleinserienfertigung vorangetrieben.

Die größten Anwendungspotenziale für die additive Fertigung in der industriellen Serienproduktion bestehen aus heutiger Sicht bei Produkten und Bauteilen, die in Einzel- und Kleinserien gefertigt werden (inkl. Ersatzteilgeschäft). Weil sich für diese Seriengrößen die Entwicklungs- und Baukosten der in der konventionellen Produktion benötigten Werkzeuge infolge der geringen Stückzahlen oft nicht amortisieren lassen, kann die werkzeuglose additive Fertigung die Produktionskosten reduzieren. In Einzel- und Kleinserienmärkten steht zudem meist die kundenspezifische Anpassung der Produkte und Bauteile im Vordergrund, die durch den Einsatz additiver Fertigungsverfahren bis hin zur vollständigen Individualisierung (Losgröße 1) maßgeblich erleichtert wird.

Wie Studien zu unterschiedlichen KMU-Typen im deutschen verarbeitenden Gewerbe zeigen (Som 2012; Zanker et al. 2014), finden sich in den Märkten der Einzel- und Kleinserien vorwiegend KMU, die nicht selten Hidden Champions sind, also in der Öffentlichkeit weitgehend unbekannte Unternehmen mit Weltmarktführerstellung für ein spezifisches Nischenprodukt oder eine spezifische Anwendung. Diese Unternehmen positionieren sich in der industriellen Wertschöpfungskette häufig als technische Prozessspezialisten, die gemäß den Spezifikationen und Wünschen ihrer Kunden komplexe technische Herstellungsprozesse entwickeln und ausführen sowie produktbegleitende Dienstleistungen im Bereich der Prozessentwicklung anbieten. In der Wertschöpfungskette sind diese Unternehmen häufig Teile- und Komponentenzulieferer und fertigen für industrielle Kunden, die hohe Erwartungen an die Zuverlässigkeit der Produkte haben. Technische Prozessspezialisten zeichnen sich durch einen überdurchschnittlich starken Einsatz moderner Produktionstechnologien aus und sind daher wichtige Diffusionsmotoren für neue Technologien allgemein (Som/Kinkel 2012).

Technische Prozessspezialisten können auch bei der Diffusion additiver Fertigungsverfahren in die industrielle Praxis in Deutschland eine Schlüsselrolle

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

einnehmen, da sie von ihren Kunden gezielt zur Suche nach neuen Realisierungsmöglichkeiten technischer Prozesse herangezogen werden und nicht selten die komplette Entwicklung und Projektierung des späteren Serienprozesses übernehmen. Somit bieten ihre Wettbewerbsstrategie, das vorhandene hohe technologische Prozess-Know-how sowie ihre Produktions- und Arbeitsstrukturen gute Bedingungen für die Anwendung additiver Fertigungsverfahren. Die Erfolgsbeispiele können bei anderen KMU in ähnlichen Märkten als Impuls für eine Adoptionsentscheidung dieser Technologie dienen.

These 6

Additive Fertigungsverfahren schaffen neue Potenziale für eine höhere Wertschöpfungstiefe in den Unternehmen. Damit verbunden sind Herausforderungen, aber auch Perspektiven für KMU in Märkten der Nischen- und Sonderfertigung.

Im Falle einer breiten Anwendung in der Industrie hat die additive Fertigung das Potenzial, bestehende Strukturen industrieller Wertschöpfungsketten zu verändern. Hierbei steht insbesondere die Wiedereingliederung (Insourcing) von vormals an externe Partner ausgelagerten Wertschöpfungsprozessen im Vordergrund. Additive Fertigungsverfahren könnten es erlauben, ehemals teure und aufwendige Prozesse und Arbeitsschritte der Variantenindividualisierung wieder ins Unternehmen zu holen und dadurch Potenziale zur Erhöhung der Unternehmensproduktivität und -wettbewerbsfähigkeit zu bieten. Eine derartige strukturelle Verschiebung könnte nach Einschätzung mancher Experten insbesondere für Zulieferunternehmen in Märkten der Nischen- und Sonderfertigung dazu führen, dass ihr bestehendes Geschäftsmodell sukzessive erodiert.

Jedoch lassen sich auch Argumente finden, die einen Fortbestand von KMU als Zulieferspezialisten gerade bei einer breiten Diffusion der additiven Fertigung in der deutschen Industrie nahelegen. Erstens benötigt der erfolgreiche Serieneinsatz additiver Fertigungsverfahren vergleichbar zu konventionellen Verfahren ein hohes Maß an technischem Prozess-Know-how, das viele Unternehmen gerade bei Kleinserien nicht intern vorhalten wollen oder können. Dabei können sich strukturelle Verschiebungen innerhalb der Zuliefererbranchen ergeben. Das lässt sich am Bespiel einiger wissensintensiver Dienstleister ablesen, die mithilfe der additiven Fertigung nun Lösungen aus einer Hand anbieten und neben Konstruktionsdaten und spezialisiertem Prozesswissen neu auch Werkzeuge, Werkzeugkomponenten, Einzelteile oder Kleinserien selbst fertigen. Zweitens sind KMU durch ihre strukturellen Besonderheiten (kurze Entscheidungswege, flache Hierarchien) im Vergleich zu größeren Unternehmen häufig in der Lage, entsprechende Bauteile, Produkte und Dienstleistungen mit einer

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

höheren Geschwindigkeit und Flexibilität bereitzustellen. Drittens bietet die additive Fertigung für Zulieferer-KMU die Chance, ihren Vorteil der räumlichen Nähe zu den Entwicklungszentren großer Kunden bei der Entwicklung kundenspezifischer Lösungen weiter auszubauen, und ermöglicht es gleichzeitig, ihre Produkte auch ohne eigene globale Produktionslogistik weltweit direkt in den jeweiligen Niederlassungen ihrer Kunden zu fertigen. Viertens positionieren sich in jüngerer Vergangenheit manche KMU bereits als spezialisierte Zulieferer, deren Geschäftsmodell auf additiven Fertigungsverfahren basiert.

Dies verdeutlicht, dass ein erfolgreicher Fortbestand von KMU im Zulieferer- bzw. Prozessspezialistensegment auch davon abhängen wird, inwiefern rasch technische Lösungen verfügbar sind, die den besonderen Anforderungen von KMU entsprechen (Skalierbarkeit, Robustheit, Flexibilität, geringe Investitionskosten etc.).

These 7

Hybride Fertigungsverfahren sind ein wichtiger Schritt zur weiteren Überführung der additiven Fertigung in die industrielle Serienproduktion.

Vor dem Hintergrund einer eher schrittweisen Einführung der additiven Fertigung in der industriellen Serienproduktion wird der Kombination additiver und konventioneller Fertigungsverfahren – der hybriden Fertigung – in Deutschland ein besonderer Stellenwert beigemessen (vgl. Stauß 2015). Additive Fertigungsverfahren können mit ihren Vorteilen dort ansetzen, wo die Möglichkeiten konventioneller Verfahren an ihre Grenzen stoßen. So könnte das Basisbauteil kostenoptimiert konventionell gefertigt und die Kundenindividualisierung in einem zweiten Produktionsschritt mit additiven Fertigungsverfahren vorgenommen werden. Beispiele hierfür sind das Aufbringen funktionaler Schichten auf das Basisbauteil (die z.B. bei Wartungsarbeiten wiederholt aufgedruckt werden könnten, anstatt das ganze Bauteil zu ersetzen), das Aufbringen von Logos, Hinweisen oder komplexer Strukturen wie elektrischer Leiterbahnen. Umgekehrt sind auch Einsatzgebiete denkbar, in welchen der Rohling additiv gefertigt (z.B. mit einer komplexen Geometrie) und das Werkstück durch konventionelle Verfahren weiterbearbeitet wird.

Der diffusionsbeschleunigende Effekt der hybriden Fertigung gerade für KMU könnte darin bestehen, dass die Unternehmen auf ihrem bestehenden Know-how aufsetzen und dieses sukzessive um additive Fertigungsverfahren erweitern können. Den Unternehmen eröffnet dies die Gelegenheit, sowohl bestehende Kunden an die Möglichkeiten der additiven Fertigung heranzuführen als auch durch die erweiterten Möglichkeiten neue Kundengruppen anzusprechen.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Gleichwohl sollten die Akteure in Deutschland nicht das grundsätzliche disruptive Potenzial der additiven Fertigung außer Acht lassen. Während hybride Verfahren als inkrementelle Verbesserung bestehender Prozesse in den kommenden 5 bis 10 Jahren das Potenzial haben, aufgrund ihrer höheren Anschlussfähigkeit an konventionelle Verfahren die Schaffung von neuem Wissen und Know-how im Bereich der additiven Fertigung in Deutschland voranzutreiben, besteht die Möglichkeit, dass andere Akteure auf der Bildfläche erscheinen, deren Entwicklungen hinsichtlich neuer additiver Fertigungsverfahren, Bauteilgeometrien, Funktions- und Werkstoffeigenschaften oder Geschäftsmodellen auch hybride Verfahren substituieren können. Dies gilt es nicht nur sorgsam zu beobachten, vielmehr sollten deutsche Akteure selbst proaktiv an solchen potenziell disruptiven Entwicklungen weiterarbeiten.

These 8

Additive Fertigungsverfahren verfügen in den kommenden 10 Jahren nicht über die erforderlichen technischen Leistungsmerkmale, um in der industriellen Mittel- und Großserienfertigung eingesetzt zu werden.

Stellt man die Anforderungen der heutigen industriellen Mittel- und Großserienproduktion (z.B. in der Automobilindustrie) – Automatisierung, kurze Taktzeiten, Robustheit, Verfügbarkeit, Standardisierung, Reproduzierbarkeit – den technischen Leistungseigenschaften additiver Fertigungsverfahren gegenüber, wird deutlich, dass die resultierenden Schnittmengen noch klein sind. Ausschlaggebend hierfür sind vor allem der hohe Anteil manueller Tätigkeiten für die Bedienung der additiven Fertigungsanlagen und die Nachbearbeitung der Bauteile, die daraus resultierende schwierige Automatisierung und unzureichende Integration in bestehende Fertigungsabläufe, die nach wie vor (zu) hohen Takt- und Rüstzeiten, die mangelhafte Reproduzierbarkeit aufgrund unzureichend erforschter physikalisch-mechanischer Werkstoff- und Bauteileigenschaften, die für viele industrielle Anwendungen unzureichende Oberflächenqualität der Bauteile sowie die eingeschränkte Material- und Werkstoffverfügbarkeit (Kap. III.6). Dies gilt nicht für alle additiven Fertigungsverfahren in gleicher Weise, ist aber dennoch typisch beim Vergleich mit konventionellen Methoden. Im Ergebnis werden die Produktionskosten additiv gefertigter Bauteile vielfach als zu hoch für eine industrielle Serienproduktion eingeschätzt.

Es ist davon auszugehen, dass manche technischen Hürden relativ zeitnah überwunden werden können, z.B. das noch fehlende Wissen über physikalisch-technische Grundlagen additiver Fertigungsverfahren als Grund für die mangelhafte Reproduzierbarkeit der Bauteile. Andere Hürden gelten als schwieriger zu überwinden, z.B. die vergleichsweise langsame Prozessgeschwindigkeit, die unzu-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

reichende Automatisierung vor- und nachgelagerter Produktionsschritte oder die mangelhafte Präzision und Oberflächenqualität der Bauteile. Insgesamt ist damit nicht zu erwarten, dass additive Fertigungsverfahren in den kommenden 10 Jahren in die industrielle Mittel- und Großserienfertigung Einzug halten werden.

These 9

Eine weitere Diffusion additiver Fertigungsverfahren in die industrielle Serienproduktion erfordert die Überwindung der eingeschränkten Material- und Werkstoffverfügbarkeit.

Derzeit ist die Verfügbarkeit an Materialien und Werkstoffen für die additive Fertigung als gering einzuschätzen. Dies liegt auch daran, dass Hersteller von additiven Fertigungsanlagen die Materialien, die damit verarbeitet werden können, meist noch auf einige wenige Ausgangsstoffe bestimmter Hersteller beschränken, da die zugesicherten Leistungsparameter der Anlagen und der damit gefertigten Bauteile nur mit diesen getesteten Materialien erreicht werden können (Heil 2014, S. 15). Die Verwendung von Ausgangsmaterialen anderer Hersteller könnte die Anlagen sogar beschädigen.

In der Folge gehen Anwender beim Kauf einer additiven Fertigungsanlage eine relativ große Abhängigkeit gegenüber den Material- und Werkstoffherstellern ein. Die entsprechenden Marktstrukturen mit teilweise oligopolem Charakter schlagen sich darin nieder, dass beispielsweise Kunststoffgranulate für die additive Fertigung bis zu zehnmal teurer sind als Granulate für konventionelle Verfahren.

Eine durch steigende Absatzzahlen bei additiven Fertigungsanlagen getriebene Zunahme des Wettbewerbs könnte künftig insgesamt zu sinkenden Material- und Werkstoffkosten beitragen. Allerdings lässt sich zum jetzigen Zeitpunkt nur sehr vage abschätzen, ob bzw. inwieweit sich am bestehenden Materialmarkt neue, internationale Wettbewerber oder Drittanbieter etablieren können. Gegen eine schnelle Erhöhung der Zahl der Anbieter spricht der Patentschutz, mit dem sich die Hersteller gegenüber neuen Wettbewerbern abgesichert haben. Mittelfristig wird zumindest erwartet, dass der zunehmende Wettbewerb zu Preissenkungen bei den Ausgangsmaterialien aus Kunststoff führt.

These 10

Die erforderlichen Kompetenzen und Qualifikationen für additive Fertigungsverfahren sind in der Breite vor allem in KMU nicht in ausreichendem Maße vorhanden.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Das zur weiteren Verbreitung additiver Fertigungsverfahren notwendige technische, prozessbezogene und kaufmännische Wissen ist nicht in gleichem Maße bei allen Marktteilnehmern verfügbar. Insbesondere KMU haben aufgrund ihrer begrenzten Personal- und Finanzressourcen bereits heute oft Schwierigkeiten, die Kompetenzen ihrer Beschäftigten in den bestehenden Geschäftsbereichen auf dem aktuellen Stand zu halten. Eine strategische Kompetenzentwicklung findet gegenwärtig in den meisten KMU nicht in ausreichendem Maße statt. Damit einhergehend fehlt vielen potenziellen Anwenderunternehmen auch das Verständnis für die sich stellenden rechtlichen Herausforderungen (Schutz intellektuellen Eigentums, Haftungsfragen etc., Kap. VI).

Die im Kontext der additiven Fertigung notwendigen Kompetenzen und Qualifikationen erfordern erstens die praxisorientierte Fortbildung und Weiterqualifikation von Produktionsbeschäftigten und -planern hinsichtlich der Bedienung, Steuerung und fertigungstechnischen Einbindung additiver Fertigungsanlagen. Zweitens wird insbesondere vor dem Hintergrund der Entwicklung komplett neuer Produkte bzw. der Erschließung neuer Anwendungsfelder die Kompetenzentwicklung der Beschäftigten im Produktdesign und in der Konstruktion von entscheidender Bedeutung sein, beispielsweise hinsichtlich bionischer Bauteilstrukturen, neuer Werkstückgeometrien oder der Integration funktionaler Strukturen in Bauteile. Drittens entstehen auch Qualifikations- und Weiterbildungsbedarfe in den der Produktion vor- und nachgelagerten kaufmännischen Bereichen (Einkauf, Vertrieb, Kundenservice, Compliance etc.).

Eine stärkere Verankerung entsprechender Lehrinhalte in den Curricula von Hochschulen, Berufsakademien, Industrie- und Handelskammern etc. erfordert das Vorliegen bestimmter Branchen- und Technologiestandards (z.B. Prozessstandards, Qualitätsstandards, Leistungsspezifikationen von Anlagen), die es für die additive Fertigung aufgrund der sehr unterschiedlichen Verfahren und Technologien derzeit allerdings noch nicht gibt.

These 11

Viele KMU haben Schwierigkeiten bei der Identifikation von Anwendungspotenzialen, neuen Geschäftsmodellen und der passgenauen Einstiegstechnologie.

Viele Unternehmer im Bereich der KMU stellen sich die Frage, ob ihre konventionell hergestellten Bauteile bei heutigem Stand der Technik überhaupt additiv gefertigt werden können. Diese Unklarheit wird auf die als unübersichtlich eingestufte, fragmentierte Landschaft an unterschiedlichen additiven Fertigungsverfahren mit ihren jeweils spezifischen Stärken und Schwächen zurückgeführt. Vertreter von KMU, die noch keine additiven Fertigungsverfahren einsetzen,

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

betonen, dass es ihnen trotz eines hohen Interesses an der Thematik nicht möglich ist, die Breite der unterschiedlichen Verfahren und Transferangebote zu überblicken. Hinzu kommt, dass viele KMU eher noch einen handwerklichen Modus der Technologieeinführung (problemorientierte Ad-hoc-Erprobung) pflegen und nur selten ein systematisches Technologiemanagement betreiben.

Viele Unternehmer formulieren den Wunsch nach einer technologischen Einstiegsberatung für die additive Fertigung. Eine Art Lotsendienst könnte KMU bei der Auswahl der für ihr Geschäftsmodell geeigneten additiven Fertigungsverfahren unterstützen und sie bezüglich rechtlicher, ökologischer und arbeitsschutzbezogener Fragestellungen sensibilisieren und beraten. Ein solcher Service könnte durch intermediäre Akteure (z.B. Industrie- und Handelskammern, Verbände) oder durch bestehende Forschungseinrichtungen erbracht werden. Begleitend hierzu wird für die Entwicklung eines »Kompetenzatlasses additive Fertigung« für Deutschland (Wer kann was?) ein großer Bedarf gesehen. Zur Umsetzung dieser Maßnahme könnten beispielsweise Begleitforschungsprojekte dienen.

These 12

Die Schaffung von unabhängigen Einrichtungen zur Erprobung unterschiedlicher additiver Fertigungsverfahren könnte maßgeblich zur Diffusion der additiven Fertigung bei KMU beitragen.

KMU, die in die additive Fertigung einsteigen möchten, haben aufgrund der hohen Investitionskosten normalerweise nicht die finanziellen Spielräume, um in mehrere additive Fertigungsverfahren parallel zu investieren, um dadurch das für sie passende Verfahren zu identifizieren. Das Risiko einer Investition in das falsche Verfahren stellt somit für KMU eine erhebliche Anwendungsbarriere dar. Gegenwärtig verzichten daher viele Unternehmen bewusst auf die Anschaffung einer Anlage und damit auf die Festlegung auf ein Verfahren.

Um Investitionsrisiken für KMU zu reduzieren, wird der Wunsch nach Pilotlinien für additive Fertigungsverfahren geäußert.[56] Hierbei sollen unter wissenschaftlicher Begleitung Pilotfertigungslinien errichtet werden, die interessierten Unternehmen für Machbarkeitstests, die Herstellung von Funktionsmustern sowie den Erfahrungsaustausch zur Verfügung stehen.

Zu klären wäre jedoch die Vereinbarkeit von Pilotlinien mit dem Prinzip der Vorwettbewerblichkeit in der öffentlichen Technologie- und Innovationsforschung. Prinzipiell wäre darauf zu achten, dass deren Nutzung und daraus

56 Der Ansatz wird auf EU-Ebene intensiv diskutiert und wurde in ersten Projekten bereits umgesetzt (z.B. Projekt »mKETs pilot lines«: Pilotlinien für Schlüsseltechnologien im Bereich Nanotechnologie, Mikroelektronik oder Photonik).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

erzielte Ergebnisse allen Interessenten ohne Einschränkung zur Verfügung stünden und die Pilotlinien die gebotene Vielfalt unterschiedlicher Verfahren abdecken würden. Eine Herausforderung würde darin bestehen, die Ausstattung solcher Pilotlinien immer auf dem neusten technischen Stand zu halten.

These 13

Eine Fokussierung auf die wichtigsten additiven Fertigungsverfahren, gemessen am Anwendungspotenzial in der Breite, sowie die Entwicklung industrieller Standards für diese Verfahren würden die Diffusion der additiven Fertigung in die industrielle Serienproduktion beschleunigen.

Zur Beschleunigung der Diffusion der additiven Fertigung in die industrielle Serienproduktion in Deutschland regen Technologieexperten und Unternehmensvertreter an, die Technologieförderung in Deutschland stärker auf einige, für die breite industrielle Anwendung besonders relevante Kernverfahren zu konzentrieren, anstatt die bestehende Vielfalt der additiven Fertigungsverfahren in der Breite zu fördern und dadurch eventuell sogar noch zu erweitern. Die Auswahl der Kernverfahren bedingt eine sorgfältige, fundierte und umfangreiche Analyse der relevanten additiven Fertigungsverfahren aus Anwender- und Entwicklerperspektive, für die sich in Deutschland ein Leitmarkt etablieren könnte.

Für diese Kernverfahren wäre die Entwicklung industrieller Standards voranzutreiben. Diese sind gleichermaßen Voraussetzung für eine Überführung des mit den Kernverfahren verbundenen technischen Wissens in die Hochschul- und Berufsausbildung sowie für die Klärung offener Rechts- und Haftungsfragen, was wiederum entscheidend für eine schnelle Überführung der Kernverfahren in die Praxis ist. Aufgebaut werden kann hierbei auf den Richtlinien VDI 3404 und VDI 3405 »Additive Fertigung; Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen«[57] des VDI. Bis allgemeingültige Branchen- und Industriestandards (z.B. in Form von DIN- oder ISO-Normen) etabliert werden können, ist allerdings noch viel Arbeit notwendig.

These 14

Die stärkere Integration aller Wertschöpfungspartner in technologischen Verbundprojekten der Forschungsförderung erleichtert die Entwicklung bedarfsorientierter Lösungen sowie den Wissenstransfer an vor- und nachgelagerte Wertschöpfungspartner.

57 www.vdi.de/3404 und www.vdi.de/3405 (22.12.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Viele (potenzielle) Anwenderunternehmen und vor allem KMU befürchten, dass die heute verfügbaren Systeme der additiven Fertigung an den Anforderungen der industriellen Serienproduktion noch vorbeizielen.

Um Kunden- und Anwenderanforderungen optimal in den technologischen Entwicklungsprozess zu integrieren, sollten an Verbundprojekten der Forschungsförderung immer möglichst viele Akteure der industriellen Wertschöpfungskette als Industriepartner beteiligt sein (Technologiehersteller, Technologieanwender, Zulieferer, Ausrüster, Dienstleister etc.). Evaluierungen anderer öffentlicher industrieller Förderprogramme in Deutschland und der EU zeigen, dass Verbundprojekte zur Entwicklung neuer, marktreifer technologischer Lösungen dann besonders erfolgreich waren, wenn diese Bedingung erfüllt war (Enzing et al. 2015; Geyer et al. 2012). Weitere Vorteile sind, dass das im Rahmen der Projekte erarbeitete Innovations- und Technologiewissen in der ganzen Wertschöpfungskette verankert wird. Darüber hinaus können frühzeitig Kunden- oder Lieferantenbeziehungen zwischen den Industriepartnern etabliert werden, sodass die Wachstums- und Innovationsimpulse im Land bleiben und bestehende Bindungen in industriellen Wertschöpfungs- und Innovationsnetzwerken (z. B. Innovationsplattformen) gefestigt werden.

KMU können hier aufgrund ihres technologischen Erfahrungs- und Anwenderwissens als Zulieferer, Ausrüster oder Anwender eine Schlüsselrolle einnehmen. Auch können sie durch ihre starke Binnenorientierung und Verflechtung mit vor- und nachgelagerten Wertschöpfungsbranchen dazu beitragen, dass entsprechende Verbundprojekte deutlich höhere inländische Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte erzielen als bei einer alleinigen Stimulierung von Technologieentwicklern. Schließlich werden KMU auf der Zuliefer- oder Ausrüsterseite nicht vorab von der technologischen Entwicklung abgekoppelt.

These 15

Eine stärkere Kopplung von technologischen Entwicklungszielen mit nichttechnischen Innovationsfeldern führt zu einer besseren Ausschöpfung der Anwendungspotenziale additiver Fertigungsverfahren.

Die bestehenden Fördermöglichkeiten und -programme im Bereich der additiven Fertigung sind, dem Prinzip der Vorwettbewerblichkeit folgend, überwiegend auf technologische Entwicklungsziele ausgerichtet. Die Fokussierung auf technologische Lösungen blendet jedoch nichttechnische Innovationsfelder aus, wie beispielsweise die Nutzung avancierter organisatorischer Maßnahmen, neue produktbegleitende Dienstleistungen oder neue Geschäftsmodelle. Diese sind für Unternehmen ebenfalls wichtige und vergleichsweise kostengünstige Stellschrauben zur Steigerung ihrer Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit. Nicht

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

selten scheitert die Umsetzung neuer technischer Prozesse oder Produkte daran, dass die zur erfolgreichen und effizienten Umsetzung erforderlichen Strukturen und Prozesse nicht angelegt sind. Auch zeigen wissenschaftliche Studien, dass nichttechnische Innovationen maßgeblich dazu beitragen, die Potenziale neuer technologischer Lösungen schneller, umfassender und effizienter zu verwerten, was wiederum nachfolgende Produkt- und Prozessinnovationen stimuliert (Evangelista/Vezzani 2012; Galia et al. 2012).

Mit der gezielten Förderung nichttechnischer Innovationsfelder würde ordnungspolitisch allerdings ein Graubereich betreten, da die gebotene Vorwettbewerblichkeit staatlicher Innovations- und Technologieförderung zumindest teilweise verlassen wird. Insbesondere die Stimulierung im Bereich der Optimierung betriebsinterner Organisationsprozesse und Abläufe weist eine hohe Marktnähe auf. Die Umsetzung etwaiger Fördermaßnahmen ist in diesen Fällen sorgsam zu prüfen und zu justieren. Generell wären Maßnahmen zu bevorzugen, die Unternehmen für die Problematik sensibilisieren und befähigen, passfähige Lösungen selbstständig zu erarbeiten und umzusetzen (Innovationsplattformen, Innovationstische etc.), anstatt bestimmte Lösungen vorzugeben.

These 16

Eine Beschleunigung der Diffusion der additiven Fertigung in die industrielle Serienproduktion erfordert die Klärung von Folgewirkungen für Gesellschaft und Umwelt sowie von rechtlichen Fragestellungen.

Ausgehend vom aktuell noch frühen Reifegrad additiver Fertigungsverfahren dominiert die technologische Betrachtungsweise die laufenden internationalen Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen. Entsprechend wird auch die öffentliche und politische Debatte vorrangig aus der Technology-push-Perspektive geführt, und Investitionen in die Technologieentwicklung werden primär durch die erwarteten wirtschaftlichen Effekte begründet (Kap. IV.1.4). Mögliche ökologische, rechtliche oder soziale Auswirkungen der additiven Fertigung spielen in den bisherigen Forschungs- und Innovationsprozessen nur selten eine explizite Rolle (Kap. V).

Beispielsweise ist ein besseres Verständnis der ökologischen Effekte der additiven Fertigung im Vergleich zu konventionellen Fertigungsmethoden notwendig, um die der additiven Fertigung zugeschriebene positive Wirkung auf Umwelt und Ressourcenverbrauch auch tatsächlich zu belegen. Auch besteht in Bezug auf die Schutzfähigkeit von digitalen 3-D-Modellen bzw. Vorlagen für die additive Fertigung eine teilweise noch unklare Rechtslage. Ein effektiver rechtlicher Schutz der digitalen Vorlagen vor unerlaubter Nutzung durch Dritte ist jedoch für alle Akteure unabdingbar, deren Geschäftsmodell auf der additiven

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Fertigung beruht bzw. die dies für die Zukunft planen. Eine bisher kaum untersuchte Fragestellung sind zudem mögliche Auswirkungen der additiven Fertigung auf die Beschäftigten und die Beschäftigung in der Produktion, die daher gegenwärtig auch noch kein Thema arbeits- und technologiepolitischer Diskussionen sind. Diese wären jedoch wichtig für eine proaktive Gestaltung des Veränderungsprozesses.

These 17

Unternehmen sollten sich für Innovationsimpulse aus der aufkommenden Makerbewegung sowie von Quereinsteigern in der Branche sensibilisieren und öffnen.

Bei der additiven Fertigung »fangen alle bei null an« (Zitat eines Unternehmensvertreters), da diese Fertigungsverfahren ein komplett neues Produktionsparadigma beschreiben. Sie erlaubt es Unternehmen wie auch Privatpersonen, die bislang keine eigene Produktentwicklung hatten bzw. noch nicht als Entwickler oder Produzenten in Erscheinung getreten sind, einen relativ einfachen und niedrigschwelligen Einstieg in eine eigene Fertigung. Manche Experten sprechen hier von einer »Demokratisierung« der Produktion (Send 2013; Wittbrodt et al. 2013). Für innovative Privatanwender bietet die additive Fertigung völlig neue Möglichkeiten, ihre Bedarfe, die bislang nicht durch bestehende Angebote am Markt abgedeckt sind, durch eine eigene Fertigung zu decken (Kap. V.1.6). Dies kann vom Nachdruck von Ersatzteilen im Haushalt über die schrittweise Modifikation bestehender Produkte bis hin zu komplett neuen Eigenentwicklungen reichen.

Es ist daher zu erwarten, dass sich Zahl und Breite produzierender Akteure mit fortschreitender Technologiereife und -diffusion in Zukunft deutlich erhöhen werden (van der Zee et al. 2015). In der Folge ist auch mit einer massiven Zunahme an Erfahrungs- und Anwenderwissen und einem hohen Innovationspotenzial bei diesen Akteuren (z.B. aus der Makerbewegung) zu rechnen. Etablierte Unternehmen sollten dies nicht als Bedrohung, sondern vielmehr als Chance und Potenzial begreifen, um sich mittels neuer Innovationsformen wie z.B. Co-Creation oder Open Innovation die daraus entstehenden Innovationsimpulse zu erschließen.

Inwieweit es etablierten Unternehmen gelingt, die Innovationsimpulse neuer und teilweise auch industriefremder Akteure und Communities zu erkennen und zu erschließen, wird eine wichtige Rolle für die weitere Entwicklung und Diffusion additiver Fertigungsverfahren für die industrielle Serienproduktion spielen. Die hierfür erforderlichen Fähigkeiten (z.B. Netzwerk- bzw. Kooperationsmanagement, Steuerung von offenen und geschlossenen Phasen im Inno-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

vationsprozess, für Open Innovation geeignete Strukturen und Prozessabläufe) können u.a. durch entsprechend angelegte Projektförderungen stimuliert werden. Ein Ansatz hierzu ist die »Make Light Initiative« des BMBF, bei der das Ziel verfolgt wird, Open-Innovation-Prozesse bei etablierten Unternehmen der Photonikbranche anzustoßen.[58] Ähnliche Initiativen könnten in weiteren Branchen mit Bezugspunkten zur additiven Fertigung gestartet werden.

These 18

Die Umsetzung von Industrie-4.0-Konzepten besitzt ein hohes Synergiepotenzial für die Diffusion additiver Fertigungsverfahren in die industrielle Serienproduktion.

Die beiden Technologiestränge Industrie 4.0/Digitalisierung und additive Fertigung stehen in der Diskussion in Deutschland meist noch unabhängig nebeneinander. In anderen Ländern (z.B. in den USA, aber auch auf EU-Ebene)[59] ist die additive Fertigung stark in die Debatten über die Digitalisierung der industriellen Produktion eingebunden bzw. wird als ein integraler Bestandteil davon gesehen. Wird Industrie 4.0 vorrangig als Methode der Automatisierung und Effizienzsteigerung bestehender Prozesse und Abläufe verstanden, ist die Schnittmenge zur additiven Fertigung eher gering. Als Methode zur Herstellung neuer, bedarfsorientierter und hochindividualisierter Produkte und zur Entwicklung neuer Dienstleistungen aufgefasst, treten mögliche Verbindungslinien und Synergiepotenziale zwischen den beiden Technologiesträngen deutlicher zutage.

Einige Anwendungspotenziale der additiven Fertigung (z.B. neue Geschäftsmodelle im Ersatzteil- und Servicebereich, hybride Fertigungsverfahren) werden durch die durchgängige Vernetzung und Digitalisierung der industriellen Produktion einfacher zu realisieren sein. Umgekehrt kann die additive Fertigung ein niedrigschwelliger Einstieg in das Thema Industrie 4.0 insbesondere für prozessorientierte KMU der Einzel- und Kleinserienproduktion sein. Im Unterschied zu den (für viele KMU abstrakten) Digitalisierungslösungen der Industrie 4.0 stellen sich hier der Nutzen bzw. die neuen technischen Möglichkeiten konkreter dar. Der Umgang mit Konstruktionssoftware, digitalen Produktdaten und die Bedienung der additiven Fertigungsanlagen kann für die Beschäftigten in der Produktion ein erster Baustein zur Entwicklung digitaler Kompetenzen

58 www.photonikforschung.de/innovationsunterstuetzung/make-light-initiative (23.12.2016)

59 Hier werden beide Technologien unter dem Bereich »Advanced Manufacturing« geführt, den Schlüsseltechnologien für die Reindustrialisierung Europas (http://ec.europa.eu/growth/industry/key-enabling-technologies/description/index_en.htm [23.12.16]).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

sein. Eine weitere große Schnittmenge beider Technologiestränge stellen die Themen digitale Sicherheit und Datenschutz dar.

Wird der Rahmen breiter gespannt, könnte es sich als zielführend erweisen, den Beitrag der additiven Fertigung in Bezug auf die Ziele, Herausforderungen und Bedarfsfelder der Neuen Hightech-Strategie der Bundesregierung (z.B. Industrie 4.0, Energiewende, Bioökonomie, Sicherheit, Mobilität, demografischer Wandel) konsistent zu verorten. Dadurch könnten technologie- und fachdisziplinübergreifend Anwendungs- und Lösungspotenziale identifiziert und somit die weitere Diffusion der additiven Fertigung in die industrielle Praxis vorangetrieben werden.

3. Gestaltungsfelder

Aus den bisherigen Untersuchungsbefunden sowie den Ergebnissen eines Expertenworkshops zur Diskussion der Thesen (Teilnehmerliste; Anhang 5) wurden fünf Gestaltungsfelder kondensiert, in denen die unterschiedlichen Akteure tätig werden könnten, um die Diffusion von additiven Fertigungsverfahren in der deutschen Industrielandschaft zu unterstützen. Die Gestaltungsfelder lauten:

1. Anwenderbasis verbreitern,
2. Barrieren abbauen,
3. inhaltliche Schwerpunkte setzen,
4. Verständnis von Innovation erweitern sowie
5. Förderung in übergeordnete Zielsetzungen einbetten.

Im Folgenden werden einige Problemstellungen in diesen Gestaltungsfeldern beschrieben und Maßnahmen skizziert, mit denen diese angegangen werden könnten. Die Maßnahmen betreffen keineswegs nur die öffentliche Hand und die Politik (z.B. Bundestag, Ministerien auf Bundes- und Landesebene, Institutionen der Forschungsförderung), sondern auch Akteure aus Wissenschaft (z.B. Universitäten, angewandte Forschung), Wirtschaft (z.B. KMU, Großunternehmen) oder Intermediäre (z.B. Verbände, Kammern).

Die Darstellung soll eine Einordnung in den Gesamtzusammenhang des Themenkomplexes ermöglichen. Dabei wird keineswegs der Anspruch erhoben, dass die beschriebenen Maßnahmen vollständig neu sind. Einige werden in ähnlicher Form bzw. in Ansätzen bereits umgesetzt. Die folgenden Ausführungen basieren in wesentlichen Teilen auf dem Gutachten des Fraunhofer ISI 2016, S. 173 ff.).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Anwenderbasis verbreitern 3.1

Für additive Fertigungsverfahren ergeben sich branchenübergreifend langfristig zahlreiche Anwendungspotenziale in der Industrie, welche nicht nur die heutigen deutschen Anbieter (Hersteller) und Anwender (Nutzer) der Verfahren und von additiv gefertigten Produkten betreffen, sondern auch künftige Nutzer in neuen Märkten und Anwendungsfeldern. Kurzfristig könnten bestehende Anwendungsfelder weiter ausgebaut sowie neue Potenziale im Bereich von Spezialanwendungen erschlossen werden und somit die Anwenderbasis sukzessive verbreitert werden.

Problemstellung 1a: begrenzte Anwendergruppen aus bestimmten bzw. einzelnen Branchen

Während einige der international führenden Entwickler- und Herstellerfirmen für additive Fertigungsverfahren und -anlagen in Deutschland beheimatet sind (u.a. EOS, SLM Solutions, Concept Laser, Voxeljet), beschränkt sich die Anwenderseite gegenwärtig auf vergleichsweise wenige (Groß-)Unternehmen und damit auf begrenzte Anwendergruppen innerhalb bestimmter/einzelner Branchen wie Automobilbau, Luft- und Raumfahrt, Medizin- und Energietechnik. Die USA beispielsweise sind dagegen erheblich breiter in den Anwenderbranchen aufgestellt (Thesen 1 bis 3).

Maßnahme: Ein Ansatzpunkt zur Stärkung der anwenderseitigen Diffusion additiver Fertigungsverfahren ist die konsequente Integration aller Wertschöpfungspartner in technologischen Entwicklungsprojekten, um die Entwicklung bedarfsorientierter Lösungen sowie den Wissenstransfer an vor- und nachgelagerte Wertschöpfungspartner zu stimulieren (These 14). Dies gilt insbesondere für die Einbindung von KMU, die durch ihr technologisches Erfahrungs- und Anwenderwissen in der Nutzung von Fertigungstechnologien maßgeblich dazu beitragen können, neue technologische Entwicklungen und Lösungen erfolgreich praktisch umzusetzen.

Umsetzungsvorschläge	Akteure
gezielte Einbindung von Anwender(gruppen) (Zuliefer-KMU, Kunden etc.) in Form gemeinsamer Entwicklungsprozesse; FuE-Förderung von Verbundprojekten mit entsprechender Konsortialstruktur; Initiierung von Austauschplattformen	*Politik*: Forschungsförderer (Bund/Länder), Projektträger

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Problemstellung 1b: Potenziale bei hochspezialisierten Anwendungen

Aufgrund bestehender Diskrepanzen in den Anforderungen der industriellen Mittel- und Großserienproduktion und der heutigen Leistungsfähigkeit additiver Fertigungsverfahren ist in den kommenden 10 Jahren nicht mit einer flächendeckenden Diffusion der additiven Fertigung in der deutschen Industrie zu rechnen (These 2). Derzeit bestehen die größten Anwendungspotenziale bei der Herstellung von (komplexen) Produkten und Bauteilen, die als Einzelstücke oder in Kleinserien gefertigt werden (inklusive Ersatzteilgeschäft). In diesen Märkten finden sich in Deutschland vorwiegend KMU, die sich als technische Prozessspezialisten positionieren und sich durch einen überdurchschnittlich hohen Einsatz moderner Produktionstechnologien auszeichnen. Nicht selten befinden sich darunter auch dem breiten Publikum eher unbekannte kleine und mittelständische Weltmarktführer (Hidden Champions), welche die frühen Anwendungspotenziale am besten erschließen können. Ihnen könnte daher eine Schlüsselrolle bei der Diffusion additiver Fertigungsverfahren in die Industrie zufallen (These 5).

Maßnahme: Politische Maßnahmen zur Förderung der Diffusion additiver Fertigungsverfahren in der Industrie sollten technische Prozessspezialisten besonders in den Blick nehmen. Diese sind gut positioniert, um als Pioniere bzw. Multiplikatoren zu wirken.

Umsetzungsvorschläge	Akteure
gezielte Förderung von KMU, die sich vorrangig über technische Prozessinnovationen im Wettbewerb positionieren (häufig Hidden Champions), z. B. (anteilige) Übernahme von Entwicklungs-/Innovationsausgaben für einzelne Unternehmen	*Politik*: Forschungsförderer (Bund/Länder), Projektträger

Barrieren abbauen 3.2

Problemstellung 2a: begrenzte Kompetenzen und Qualifikation, insbesondere bei KMU

Die erforderlichen Kompetenzen und Qualifikationen für den Einsatz additiver Fertigungsverfahren sind in der Breite vor allem in KMU nicht in ausreichendem Maße vorhanden (These 10).

Maßnahme: Bestehende praxisorientierte Qualifizierungsangebote sollten weiter ausgebaut, neue Aus- und Fortbildungsangebote entwickelt werden. Bei

Beschäftigten in der Produktion stehen hier die Bedienung, Steuerung und fertigungstechnische Einbindung additiver Fertigungsanlagen im Mittelpunkt. Für die Entwicklung komplett neuer Produkte bzw. die Erschließung neuer Anwendungsfelder der additiven Fertigung ist die Kompetenzentwicklung bei Produktentwicklern und Konstrukteuren voranzutreiben. Dies gilt auch für die der Produktion vor- und nachgelagerten kaufmännischen Bereiche. Damit diese Qualifizierungsbedarfe bis hinunter auf die zu vermittelnden Lehrinhalte in den Curricula verankert werden können, wäre die Entwicklung von Branchen- und Technologiestandards hilfreich.

Umsetzungsvorschläge	Akteure
Lehrinhalte in den Curricula von Universitäten, Hochschulen und Berufsakademien stärker verankern	*Wissenschaft*: Universitäten, Hochschulen, Berufsakademien; Fachverbände
Weiterbildungsangebote erweitern/ anpassen/ausbauen	*Intermediäre*: Branchenverbände, Wirtschaftskammern, außeruniversitäre Forschung
Schulungsangebote ausbauen	*Wirtschaft*: Anbieter von additiven Fertigungsanlagen
Experten- bzw. Industriearbeitskreise, Runder Tisch mit Vertretern aller (auch nichttechnischer) Stakeholdergruppen	*Intermediäre*: Branchen- und Fachverbände, Kammern, Industrie, Wissenschaft, Vertreter Politik und Gesellschaft

Problemstellung 2b: hohes Investitionsrisiko

Investitionen in additive Fertigungsverfahren sind aufgrund der geringeren Ressourcenausstattung gerade für KMU mit erheblichen Risiken und Unsicherheiten verbunden. Es steht eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren zur Auswahl, die für viele Einsatzzwecke oft technisch noch unausgereift sind und für die Technologiestandards generell noch fehlen. Das Risiko für Fehlinvestitionen wird häufig als hoch eingeschätzt, weshalb viele Unternehmen auf die Anschaffung einer Anlage und damit die Festlegung auf ein Verfahren verzichten. So können jedoch keine Erfahrungen gesammelt, Wissen aufgebaut oder Anwendungspotenziale ausgelotet werden (These 12).

Maßnahme: Ein Ansatzpunkt wäre die Förderung der Einrichtung von Pilotlinien für die additive Fertigung, in welchen Unternehmen im vorwettbewerblichem Kontext diverse additive Fertigungsverfahren unter möglichst realen Bedingungen erproben könnten (z.B. hinsichtlich ihrer Genauigkeit, Schnelligkeit oder der Integrationsfähigkeit in bestehende Produktionslinien). Dieser Ansatz soll künftig durch Erweiterung des BMBF-Förderinstruments »KMU-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

innovativ« verfolgt werden (BMBF 2016b, S. 10). In diesem Zusammenhang ergibt sich allerdings die Schwierigkeit, dass wirtschaftliche Lösungen entwickelt werden müssen, um die Ausrüstung der Pilotlinien kontinuierlich auf dem neuesten Stand zu halten. Das Förderinstrument von Pilotlinien wird aufgrund der sehr großen Marktnähe auf EU-Ebene intensiv diskutiert, da sich Fragen der Konformität mit dem Beihilferecht stellen. Zum Teil wurden hier bereits Anpassungen vorgenommen.[60]

Umsetzungsvorschläge	Akteure
vorwettbewerblich: KMU durch Förderung der Einrichtung von Pilotlinien bei Machbarkeitstests, Produktion von Funktionsmustern sowie Erfahrungsaustausch unterstützen	*Politik*: Forschungsförderer (Bund/Länder), Projektträger
Diffusion in die Industrie: Einrichtung und Betrieb von Pilotlinien, wissenschaftliche Begleitung; Förder- und Nutzermodelle zielgruppenspezifisch entwickeln/anpassen	*Intermediäre und Wissenschaft*: Technologie- und Gründerzentren, Hochschul- und Forschungseinrichtungen

Problemstellung 2c: Schwierige Identifikation von Anwendungspotenzialen/Geschäftsmodellen

Eine weitere Barriere für die Diffusion additiver Fertigungsverfahren in der Industrie besteht darin, dass viele KMU aufgrund fehlender Informationen Schwierigkeiten bei der Identifikation von Anwendungspotenzialen, neuen Geschäftsmodellen und bei der richtigen Einstiegstechnologie haben (These 11).

Maßnahme: Hier bietet sich der Auf- und Ausbau von zielgruppenspezifischen Beratungs- und Unterstützungsangeboten im Sinne einer Einstiegsberatung für potenzielle Anwender an.

Umsetzungsvorschläge	Akteure
Beratung: Lotsendienst für additive Fertigungsverfahren, Vermittlung technischer und nichttechnischer Aspekte	*Intermediäre und Wissenschaft*: Verbände, Kammern, anwendungsnahe Forschungseinrichtungen
Kompetenzatlas (Kontakte, Anbieter, Anwenderzentren)	*Wissenschaft*: anwendungsnahe Forschungseinrichtungen
Verankerung der Fachberatung im Rahmen von Begleitforschungen zu Fördermaßnahmen; stärkere Betonung der wirtschaftlichen Verwertung in Verbundprojekten	*Politik*: Forschungsförderer (Bund/Länder); Projektträger

60 http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-14-368_de.htm (24.3.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Problemstellung 2d: Kundenbedenken (konservative, skeptische Einstellung)

Für die Akquisition neuer Kundenaufträge sollten Unternehmen in der Lage sein, die Potenziale der additiven Fertigung bzw. die Vorteile additiv gefertigter Produkte gegenüber ihren Kunden beispielsweise durch Funktionsmuster und Machbarkeitsnachweise belegen zu können. Dies gilt umso mehr, als dass bei Kunden aus der Industrie oft eine ausgeprägte skeptische Einstellung gegenüber neuen Verfahren bzw. den daraus resultierenden Produkten vorherrscht. Nicht zuletzt aufgrund solcher Kundenbedenken ist heute vor allem bei KMU noch eine Zurückhaltung gegenüber der additiven Fertigung zu beobachten (Zanker et al. 2014).

Maßnahme: Das Ausräumen von Kundenbedenken gegenüber der additiven Fertigung könnte durch breiter angelegte Informationsmaßnahmen unterstützt werden (Darstellung guter Beispiele, Benchmarks, Demonstratoren etc.), um möglichst viele potenzielle Kunden bzw. die Gesellschaft insgesamt zu erreichen.

Umsetzungsvorschläge	Akteure
Benchmarks, Vergleiche, Highlights auf Konferenzen, Messen, Ausstellungen und/oder im Rahmen von Verbundprojekten	*Wirtschaft*: Unternehmen (Technologieführer), Konsortien und Verbundprojekte

Inhaltliche Schwerpunkte setzen 3.3

Problemstellung 3a: Material- und Werkstoffverfügbarkeit gering; Abhängigkeit von Materialherstellern

Die Verfügbarkeit verschiedener Materialen und Werkstoffe wird heute noch als gering eingeschätzt, zudem sind sie vergleichsweise teuer. Teilweise ist dies auf den Umstand zurückzuführen, dass es bisher vergleichsweise wenige Werkstoffhersteller gibt, es an Wettbewerb fehlt und additive Fertigungsanlagen oft nur mit den Materialen bestimmter Hersteller kompatibel sind (These 9).

Maßnahme: Forschungs- bzw. innovationspolitisch stellt die Schaffung weiterer grundlegender Erkenntnisse von physikalisch-mechanischen Werkstoff- und Bauteileigenschaften eine Möglichkeit für die durch die Wissenschaft getriebene Material- und Werkstoffdiversifizierung dar. Inwiefern zusätzlich wirtschaftspolitischer Handlungsbedarf zur Intensivierung des Wettbewerbs im Materialbereich besteht (beispielsweise durch das Bundeskartellamt) oder sich im

bestehenden Markt neue, internationale Wettbewerber oder Drittanbieter etablieren können, kann derzeit nicht abgeschätzt werden. Die Entwicklungen sollten im Auge behalten werden.

Umsetzungsvorschläge	Akteure
Materialforschung auf physikalische/ mechanische Eigenschaften bestehender und neuer Materialien für die additive Fertigung ausrichten	*Wissenschaft*: Hochschulen und Forschungseinrichtungen, unterstützt durch Forschungsförderung (Bund/Länder)
Monitoring potenzieller strategischer Abhängigkeiten (z.B. Materialien, Preise, Konglomerate); Förderung von Forschungsprojekten, um die Toleranz von Anlagen gegenüber Werkstoffen von Drittherstellern zu erhöhen (inklusive Schaffung von Standards)	*Politik*: Bundesministerien (z.B. BMWi), Bundeskartellamt

Problemstellung 3b: Potenziale der hybriden Fertigung erschließen

Als wichtiger Teilschritt auf dem Weg der additiven Fertigung in die industrielle Praxis sollten die Potenziale der hybriden Fertigung erschlossen werden, also die Integration konventioneller und additiver Fertigungsverfahren vorangetrieben werden (These 7). Der diffusionsbeschleunigende Effekt von hybriden Verfahren gerade für KMU besteht darin, dass die Unternehmen auf ihrem bestehenden Wissen und Know-how weitgehend aufsetzen und dieses sukzessive um additive Fertigungsverfahren erweitern können.

Maßnahme: Die Identifizierung, Erforschung und Förderung des Praxiseinsatzes von Schnittstellen zwischen additiven Fertigungsverfahren und konventionellen Produktionslinien und -verfahren sollte gezielt angegangen werden, da diese Schnittstellen eine Schlüsselrolle für die Entwicklung hybrider Verfahren einnehmen.

Umsetzungsvorschläge	Akteure
Förderung bezüglich Schnittstellenforschung auf/mit bestehenden Produktionslinien/Verfahren etc. (evolutionäre Entwicklung einer Fertigung hin zur additiven Fertigung)	*Wissenschaft/Wirtschaft*: Unternehmen, technische Prozessspezialisten; anwendungsnahe Forschungseinrichtungen, Forschungsverbünde; unterstützt durch Forschungsförderung (Bund/Länder)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Problemstellung 3c: Gefahr, disruptive Potenziale außer Acht zu lassen

Die bestehenden Stärken Deutschlands in der konventionellen Fertigung könnten dazu führen, dass deutsche Akteure bei der additiven Fertigung eher einer evolutionären Entwicklungs- und Diffusionsroute folgen, die aufbauend auf vorhandene Wissensbestände inkrementelle Verbesserungen in den bestehenden Produktdesigns und -lösungen zum Ziel haben. Die Gefahr besteht, dass damit das disruptive Potenzial der additiven Fertigung hinsichtlich völlig neuer Produkte und Geschäftsmodelle in Deutschland zu wenig Beachtung findet bzw. gänzlich außer Acht gelassen wird (These 3).

Maßnahme: Deutsche Akteure sollten proaktiv an disruptiven Entwicklungen im Bereich der additiven Fertigung arbeiten. Unterstützt werden sollte dies mit Forschungsförderung, die auf eine breite Zielgruppe von Hochschul- und Forschungseinrichtungen bis hin zu Unternehmen unterschiedlicher Branchen und Größe abzielt.

Umsetzungsvorschläge	Akteure
Setzen entsprechender Impulse, z. B. im Hinblick auf die Entwicklung neuer Konstruktionsansätze, Bauteilgeometrien oder Geschäftsmodelle	*Politik/Wissenschaft/Industrie*: Forschungsförderer (Bund/Länder), Projektträger; Unternehmen; Hochschulen, Forschungseinrichtungen, Forschungsverbünde

Problemstellung 3d: Fehlende Standards und Normen

Vor dem Hintergrund der Problematik noch weitgehend fehlender Standards und Normen im Bereich der additiven Fertigung könnte ein Ziel forschungs- und innovationspolitischer Maßnahmen darin bestehen, die Technologieförderung in Deutschland stärker auf einige, für industrielle Serienanwendungen besonders relevante Kernverfahren zu konzentrieren, anstatt die bestehende Vielfalt der additiven Fertigungsverfahren in der Breite zu fördern und dadurch eventuell sogar noch zu erweitern. Für die Kernverfahren wären zeitnah Standards und Normen zu entwickeln.

Maßnahme: Förderung des Diskurses unter Beteiligung aller relevanten Akteure zur Identifikation von Kernverfahren, für die die Schaffung von Standards und Normen prioritär vorangetrieben wird.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Umsetzungsvorschläge	Akteure
Auswahl von Kernverfahren (z.B. unter Beachtung der relevanten Branchen und Kernkompetenzen in Deutschland), die prioritär vorangetrieben werden	*Industrie* (Entwicklung und Anwendung), Verbände, Kammern; *Wissenschaft*; *Politik* (Moderation)
Reduktion des Anteils manueller Tätigkeiten in Bedienung und Nachbearbeitung, bessere Integration in bestehende Fertigungsabläufe, Steigerung der Reproduzierbarkeit sowie Robustheit der Prozesse, u.a. mit dem Ziel, standardisierte Verfahren und Prozesse zu etablieren	*Wirtschaft/Politik/Wissenschaft*: Forschungsförderer (Bund/Länder), Projektträger, Unternehmen; Hochschulen und Forschungseinrichtungen, Forschungsverbünde
Schaffung von Standards als Basis für industrielle Diffusion	*Wirtschaft*: Anbieter additiver Fertigungsanlagen in Gremien etablieren/ vernetzen, z.B. DIN, ISO

Das Verständnis von Innovation erweitern 3.4

Problemstellung 4: Fokussierung auf technologische Lösungen blendet wichtige, nichttechnische Innovationsfelder aus

Bestehende Fördermöglichkeiten und -programme im Bereich der additiven Fertigung sind überwiegend auf technologische Entwicklungsziele ausgerichtet. Die Fokussierung auf technologische Lösungen blendet jedoch wichtige, nichttechnische Innovationsfelder aus, wie beispielsweise die Nutzung avancierter organisatorischer Maßnahmen, neue produktbegleitende Dienstleistungen oder neue Geschäftsmodelle. Diese sind für Unternehmen ebenfalls wichtige und vergleichsweise kostengünstige Stellschrauben zur Steigerung ihrer Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit (These 15).

Maßnahme: Die Einbeziehung nichttechnischer Felder in den Innovationsprozess erfordert einen erweiterten Blick auf Innovation sowie eigene systematische Planungs- und Umsetzungsprozesse im Rahmen einer ganzheitlichen Innovationsstrategie. Mit der Stimulierung nichttechnischer Innovationsfelder wird ordnungspolitisch jedoch ein Graubereich betreten, da das in Deutschland geltende Primat der Vorwettbewerblichkeit in der Forschungs- und Innovationspolitik zumindest teilweise verlassen wird. Insbesondere die Optimierung betriebsinterner Organisationsprozesse und Abläufe weist eine hohe Marktnähe auf.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Umsetzungsvorschläge	Akteure
Unternehmen für nichttechnische Innovationsfelder sensibilisieren und befähigen, passfähige Lösungen selbstständig zu erarbeiten und umzusetzen (z. B. Innovationsplattformen, Innovationstische)	*Politik/Wirtschaft*: Forschungsförderer (Bund/Länder), Unternehmen
nichttechnische Innovationen in geförderten Entwicklungsprojekten stärker integrieren (Verwertungsstrategien, Dienstleistungen, spätere Marktfähigkeit, Nachnutzung durch nicht geförderte Unternehmen verbessern)	*Politik/Intermediäre*: Forschungsförderer (Bund/Länder), Projektträger; Verbände, Kammern
Öffnung gegenüber neuen Innovationsimpulsen aus der Makerbewegung sowie von Quereinsteigern in der Branche (z. B. neue Innovationsformen wie Co-Creation oder Open Innovation)	*Wirtschaft*: Unternehmen (Neueinsteiger)

Die Förderung in übergeordnete Zielsetzungen einbetten 3.5

In Förderstrategien spielt die bedarfsorientierte und durch nachhaltige Entwicklungen getriebene Förderung (z.B. Grand Challenges, Suche nach Antworten auf drängende Herausforderungen unserer Zeit) eine zunehmende Rolle, nicht nur in Deutschland (Neue Hightech-Strategie)[61], sondern auch auf EU-Ebene (Horizont 2020).

Problemstellung 5: Strategische Positionierung Deutschlands im internationalen Wettbewerb

Auch wenn Deutschland in Bezug auf die zur Verfügung gestellten staatlichen Mittel für die Forschung und Entwicklung additiver Fertigungsverfahren im internationalen Vergleich gut aufgestellt ist, erfährt die Förderung derzeit keine strategische Einbettung in übergeordnete politische Zielsetzungen. Während andere große Länder wie die USA oder China wichtige industrie- bzw. wirtschaftspolitische Ziele mit der Förderung der additiven Fertigung verfolgen, gab es in Deutschland bis vor Kurzem keine spezifische bzw. systematische Förderung dieser Technologie. Mit der 2015 durch das BMBF veröffentlichten Förderrichtlinie »ProMat_3D« wurde zwar ein erster Schritt in diese Richtung getan, gleichwohl fehlt es weiterhin an einer ressortübergreifenden Förderstrategie (Kap. IV.1.3). Auch eine stärkere strategische Einbettung in die an gesellschaftlichen Missionen ausgerichtete Forschungs- und Innovationspolitik der High-

61 www.bmbf.de/de/die-neue-hightech-strategie-86.html (23.12.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

tech-Strategie oder in längerfristige wirtschaftspolitische Ziele ist bislang noch nicht sichtbar.

In Bezug auf die öffentliche (auch internationale) Sichtbarkeit und die strategische Einbettung haben fokussierte Programme eindeutige Stärken. Deutsche Unternehmens- und Verbandsvertreter beispielsweise sprechen oft das Problem an, dass das Bewusstsein für die Chancen und Potenziale der additiven Fertigung in der deutschen Industrie viel zu schwach ausgeprägt sei, und verweisen in diesem Zusammenhang auf die Situation in den USA, wo die additive Fertigung durch das America-Makes-Programm der Regierung weithin bekannt sei und deren Potenziale besser erkannt und erschlossen würden.

Maßnahme: Für eine im internationalen Wettbewerb strategische Positionierung Deutschlands im Bereich der additiven Fertigung wird es wichtig sein, ineinandergreifende Strategien bzw. Entwicklungslinien zu verknüpfen, in bestehende übergeordnete Strategien einzubetten, hierbei Prioritäten zu setzen und auch für Gesellschaft und Umwelt wesentliche Aspekte der Nachhaltigkeit in Förderstrategien und -instrumenten zu berücksichtigen und zu integrieren.

Umsetzungsvorschläge	Akteure
Gesamtstrategie »Additive Fertigung« entwickeln; adäquate Mittelausstattung sicherstellen; Anknüpfungspunkte im Rahmen der Hightech-Strategie nutzen	*Politik*: Bundesregierung; Forschungsförderer (Bund/Länder), Projektträger
Technologiestränge additive Fertigung und Industrie 4.0/Digitalisierung miteinander verknüpfen	*Politik*: Bundesregierung; Forschungsförderer (Bund/Länder), Projektträger
Aufnahme von Nachhaltigkeitsaspekten in die Einstiegsberatung	*Intermediäre/Politik/Wissenschaft*: Verbände, Kammern (lokale) Akteure aus Politik, Wissenschaft und Gesellschaft
sozialwissenschaftliche Forschung zum Verständnis der Folgen für die Arbeitswelt; strategische Vorausschau mit den Betroffenen	*Politik/Wissenschaft/Intermediäre*: Forschungsförderer (Bund/Länder), Akteure aus Wissenschaft und Gesellschaft
Wissen der Makerbewegung zur Erarbeitung angepasster Lösungen für lokale Entwicklung nutzen; Förderung von Reallaboren	*Industrie* (Entwicklung und Anwendung) *Politik*: Forschungsförderer (Bund/Länder)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Zusammenhang und Priorisierung von Handlungsoptionen 4.

Um auf ein mögliches Ineinandergreifen der im vorherigen Kapitel abgeleiteten Handlungsoptionen und auf die notwendigen Kooperationen der jeweiligen Akteure über die Zeit hinweg einzugehen, skizziert Tabelle IV.9 eine mögliche Umsetzungsabfolge bzw. Priorisierung der beschriebenen Maßnahmen. Hierzu wurde nach Maßnahmen unterteilt, welche kurzfristig (1 bis 2 Jahre), mittelfristig (2 bis 5 Jahre) oder langfristig (5 bis 10 Jahre) realisiert werden könnten. Da viele Maßnahmen aufeinander aufbauen und idealerweise in einen strategischen Rahmen integriert werden, sollten die mittel- bis langfristigen Umsetzungsoptionen bereits heute Gegenstand der Planungen sein. Im Umkehrschluss geben viele der kurzfristig umsetzbaren Maßnahmen die Richtung für später umzusetzende Handlungsoptionen vor.

Der Umsetzungsaufwand bzw. die Eingriffstiefe der jeweiligen Maßnahmen kann stark variieren, weshalb zusätzlich danach unterschieden wurde, ob bestehende Instrumente direkt genutzt werden können (geringer Umsetzungsaufwand), Instrumente angepasst oder erweitert (mittlerer Umsetzungsaufwand) oder Instrumente gegebenenfalls völlig neu gedacht und entwickelt werden müssten (hoher Umsetzungsaufwand).

Tab. IV.9 Mögliche Umsetzungsabfolge bzw. Priorisierung von Handlungsoptionen

Nutzung bestehender Instrumente	
kurzfristig (1–2 Jahre)	Prüfung bereits geplanter Förderprogramme auf Schnittstellen und Aspekte mit Bezug zur additiven Fertigung und gegebenenfalls erste Aufnahme von Themen und Kriterien gemäß (1–5), insbesondere inhaltliche Schwerpunktsetzung durch Diversifizierung der Materialforschung und Entkopplung von Verfahren (3a), Schnittstellenforschung hybride Fertigung (3b), disruptive Ansätze (3c); zusätzlich Aufstellung von Konsortien in Verbundprojekten entlang Wertschöpfungskette als Kriterium der Projektauswahl (1a) Ausschreibung: »Kompetenzatlas« additive Fertigung in Deutschland (2c) Ausschreibung: Monitoring bezüglich potenzieller strategischer Abhängigkeiten (z.B. Materialien, Preise, Konglomerate) (3a) gute Beispiele für additive Fertigung: Benchmarks, Highlights, Demonstratoren, Messen/Ausstellungen (2d), Verstetigung und Fortführung in späteren Instrumenten

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

mittelfristig (2–5 Jahre)	Ausarbeitung einer maßgeschneiderten wirtschafts- und innovationspolitischen Strategie (über 2020 hinaus) unter Berücksichtigung der Verbindungslinien mit anderen Prioritäten (u. a. Industrie 4.0) und gesellschaftlichen Herausforderungen (Integration in die Hightech-Strategie); damit verbunden ist eine adäquate Mittelbereitstellung für dedizierte Förderprogramme und weitere Instrumente (5) (Verbund-)Förderung: Einbindung von Kundengruppen (Co-Development und Co-Creation) (1a), Betonung wirtschaftliche Verwertung (2c), Berücksichtigung nichttechnischer Innovationen (4), Sensibilisierung für Aspekte der Nachhaltigkeit und gesellschaftliche Auswirkungen (5)
langfristig (5–10 Jahre)	Evaluierung neuer Instrumente bezüglich strategischer Ziele und Wirkungen (1–5), Evaluierung der Gesamtstrategie »Additive Fertigung« (5)
Anpassung/Erweiterung von Instrumenten	
kurzfristig (1–2 Jahre)	Initiierung eines industrie- bzw. branchenübergreifenden Austauschs (Plattformen) (1a/b, 1–5); Etablierung bzw. Stärkung von Experten- bzw. Industriearbeitskreisen, runde Tische (einschließlich nichttechnischer Stakeholdergruppen) (2a, 1–5) Initiierung Auswahlprozess für Kernverfahren (3d) Bildung: Arbeitskreis mit Fokus auf Qualifikationsprofile einsetzen (2a) Vorarbeiten für Erarbeitung von Standards und Normen (3d) Förderung sozialwissenschaftlicher Forschungsprojekte zu den Auswirkungen auf die Arbeitswelt und auf weitere gesellschaftliche Bereiche (5) Prüfung bereits in Planung befindlicher Begleitforschungsvorhaben um Erweiterungspotenziale in Bezug auf gesellschaftliche und ökologische Auswirkungen und auf rechtliche Fragestellungen (5)
mittelfristig (2–5 Jahre)	Institutionalisierung von Innovationsplattform(en) zur additiven Fertigung (4, 1–5) dedizierte Förderprogramme »Additive Fertigung zur Erschließung breiter Anwenderbranchen« (ggf. Leitanbieter-/Leitmarktgedanke) (1a) sowie Berücksichtigung neuer Förderkriterien (2–5) Bildung: Schulungs- und Weiterbildungsangebote ausbauen (2a) Standardisierungsprozess (Ausgangsbasis Kernverfahren, Grundlage für künftige Qualifikationsprofile) (3d) Ausbau Beratungsinstrumente: Verankerung der Fachberatung z.B. in Begleitforschung, z.B. im Hinblick auf Verwertungsstrategien (2c), Sensibilisierung für nichttechnische Innovationen, branchenübergreifende Öffnung (4) Nutzung von strategischer Vorausschau, um die Auswirkungen auf die Arbeitswelt und auf weitere gesellschaftliche Bereiche mit allen Akteuren und insbesondere den Betroffenen zu gestalten; Strategien zur Eindämmung unerwünschter Folgen entwickeln (5)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

langfristig (5–10 Jahre)	Etablierung von Standards (inklusive nichttechnischer Aspekte) (3d) Bildung: stärkere Verankerung in den Lehrinhalten (2a) Lessons learned (Anpassen, Erweitern und gegebenenfalls Einstellen von Instrumenten) (1–5)
Entwicklung neuer Instrumente	
kurzfristig (1–2 Jahre)	Prüfung der Förderfähigkeit und -modalitäten von Unternehmen sowie auch von Einzelpersonen in Ergänzung zur Projektförderung (1b) und Förderung von Organisationen (4) Vorbereitung Förder- und Nutzermodelle für Pilotlinien (2b); Prüfung existierender Pilotlinien und Vorprojekte bzw. -arbeiten (u. a. bezüglich Beihilfefragen) Aufbau zielgruppenspezifischer Beratungsinstrumente: Lotsendienst für additive Fertigung (2c) sowie Integration nichttechnischer Aspekte in die Einstiegsberatung (5)
mittelfristig (2–5 Jahre)	Pionieranwender stärker unterstützen durch Unternehmens- statt Projektförderung (z. B. anteilige Förderung der FuE-Ausgaben) (1b) Impulse aus der Makerbewegung fördern durch Personen- statt Organisationsförderung (4) neue Förderinstrumente für Pilotlinien umsetzen (2b) Förderung von Reallaboren zur Erarbeitung von lokalen Lösungen für gesellschaftliche Herausforderungen, u. a. durch Nutzung von Potenzialen der Makerbewegung (4, 5)
langfristig (5–10 Jahre)	Pilotlinien gegebenenfalls als Nukleationskeime (2b) für Diffusion additiver Fertigungsverfahren und Anwendungen mit erweiterten Angeboten (1–4), z. B. durch angegliederte Bildungs- (2a), Beratungs- (2c) und/oder Demonstrationszentren

Quelle: Fraunhofer ISI 2016, 212 f.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Wirtschaftliche, ökologische und gesellschaftliche Auswirkungen V.

In der Medienberichterstattung wird die additive Fertigung bzw. der 3-D-Druck vielfach als revolutionäre Technologie dargestellt, welche die industrielle Fertigung, etablierte Wertschöpfungsketten und Warenströme sowie unseren Alltag massiv verändern könnte. Typische Artikelüberschriften lauten: »3-D-Druck leitet dritte industrielle Revolution ein« (Die Welt), »Brrrt, ssst, fertig. Zahnkronen? Spielzeug? Autoteile? Kein Problem mit 3-D-Druckern. Die Maschinen werden immer leistungsfähiger – und sie können nun die Weltwirtschaft umkrempeln« (Die Zeit), »3-D-Drucker lehren die Logistiker das Fürchten« (Die Welt), oder: »Fabrik auf dem Schreibtisch. Ich baue mir die Welt – Wie 3D-Drucker unseren Alltag revolutionieren« (Focus Online). Zunehmend finden sich aber auch kritischere Betrachtungen, die den Blick auf mögliche Risiken wie Sicherheitsaspekte oder Haftungs- und Gewährleistungsfragen richten. Soziale (z.B. Beschäftigungseffekte) oder ökologische Wirkungen und Folgen der additiven Fertigung werden in der medialen Berichterstattung bisher nur selten aufgegriffen (VDI/VDE-IT 2015, S. 57).

Zurzeit basieren mittel- bis langfristige Vorhersagen und Folgenabschätzungen zur additiven Fertigung beinahe ohne Ausnahme auf Spekulationen, persönlichen Einschätzungen und generell auf unsicheren Prognosen zur weiteren technischen Entwicklung und Verbreitung der Verfahren im industriellen und privaten Bereich. Dies liegt an dem noch frühen Entwicklungsstadium und geringen Verbreitungsgrad der Technologie, sodass Erfahrungen aus der Praxis noch weitgehend fehlen (etwa hinsichtlich möglicher Auswirkungen auf bestehende Praktiken und Strukturen der industriellen Produktion oder die Beschäftigung). Damit korrespondiert auch die bisher sehr stark technologieorientierte Forschung, während eine wirtschafts- und sozialwissenschaftliche Forschung zur additiven Fertigung erst im Entstehen begriffen ist.

Dementsprechend bauen die nachfolgenden Ausführungen zu möglichen wirtschaftlichen, gesellschaftlichen und ökologischen Folgen der additiven Fertigung weniger auf einer fundierten theoretischen oder empirischen Wissensbasis auf, sondern auf größtenteils noch sehr unsicheren Annahmen und lückenhaften Wissensbeständen. Daher sei bereits an dieser Stelle vorgreifend auf den umfassenden wirtschafts- und sozialwissenschaftlicher Forschungsbedarf hingewiesen.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Ökonomische und sozioökonomische Auswirkungen 1.

Im industriellen Bereich befinden sich additive Fertigungsverfahren zur Herstellung von Endprodukten an der Schwelle zu einer breiten Diffusion in die Praxis. Zwar beschränkt sich ihr Einsatzfeld derzeit noch hauptsächlich auf die Herstellung komplexer Bauteile als Einzelstücke oder Kleinserien, zudem sind die heute bereits marktfähigen Anwendungen noch nicht sehr zahlreich. Die jüngsten Dynamiken in den Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten (Kap. IV.1.4) wie auch das hohe Interesse an additiven Fertigungsverfahren in zahlreichen Branchen (Kap. II.1) sprechen allerdings klar dafür, dass deren Bedeutung in der industriellen Produktion kontinuierlich steigen wird und sie künftig auch für die industrielle Serienfertigung mit größeren Stückzahlen immer attraktiver werden. Parallel dazu (und doch weitgehend unabhängig davon) haben in den letzten Jahren auch Geräte, Materialien und Software für den privaten 3-D-Druck in puncto Leistungsfähigkeit und Bedienbarkeit einen substanziellen Sprung nach vorne gemacht (wenngleich sich die Technik insgesamt noch in einer frühen Entwicklungsphase befindet) und jährlich verdoppelt sich die Zahl der weltweit verkauften 3-D-Drucker (Kap. II.2).

Substitution von konventionellen Erzeugnissen und Fertigungsverfahren 1.1

Eine offensichtliche Folge der wachsenden Verbreitung additiver Fertigungsverfahren in der industriellen Produktion ist ein rückläufiges Wertschöpfungspotenzial für die entsprechenden konventionell gefertigten Produkte, aber auch für die hier eingesetzten Produktionsmittel (konventionelle Werkzeuge, Formen, Maschinen und Produktionsanlagen) und Halbzeuge (Bleche, Profile, Rohre etc.). Für die etablierten, konventionell ausgerichteten Produzenten kann sich dies zu einem beträchtlichen, unter Umständen existenzbedrohenden Risiko entwickeln, da nicht nur ihr bisheriges Geschäftsmodell zunehmend erodieren, sondern gleichzeitig auch der vorhandene Erfahrungsschatz zu konventionellen Konstruktions- und Fertigungsweisen an Bedeutung verlieren kann (Fraunhofer ISI 2016, S. 54 f.).

Hiervon betroffen könnten insbesondere Hersteller sein, die sich auf die Fertigung komplexer Bauteile mit hochentwickelten konventionellen Verfahren spezialisiert haben (hochpräzises CNC-Fräsen, Funkenerodieren etc.). Diese werden sich zunehmend Wettbewerbern zu stellen haben, die dieselben oder funktionsähnliche Bauteile additiv fertigen und dadurch nicht nur schneller und günstiger anbieten, sondern darüber hinaus unter Umständen mit verbesserten Produkteigenschaften aufwarten können. Aber auch verschiedene Zweige des

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

klassischen Handwerks (z.B. Tischler, Gold- und Silberschmiede, Steinbildhauer, Zahntechniker, Modell- oder Formenbauer) werden mit Auftragsrückgängen und Ertragseinbußen konfrontiert, sollten ihre Erzeugnisse künftig im wachsenden Maße additiv gefertigt (wie dies in der Zahntechnik schon heute der Fall ist und sich in Teilen der Designbranche abzeichnet, Kap. II.1) bzw. gar nicht mehr benötigt werden (z.B. Gussformen oder Werkzeuge für die konventionelle Produktion).

Dabei profitieren neue Marktakteure vom vergleichsweise niedrigschwelligen Einstieg in die additive Fertigung: Während konventionelle Produktionssysteme typischerweise hohe Investitionen in Werkzeuge, Maschinen und Produktionsanlagen sowie entsprechendes fertigungstechnisches Know-how erfordern, lassen sich mit ein und derselben additiven Fertigungsanlage vergleichsweise einfach beinahe beliebig komplexe Erzeugnisse herstellen. Für junge bzw. neue Unternehmen, die nur über begrenzte finanzielle Mittel, dafür aber über ein hohes Innovationspotenzial verfügen (z.B. Start-up-Unternehmen), bietet die additive Fertigung ein ideales Instrument, um in die angestammten Märkte der etablierten Produzenten mit neuartigen, meist stark individualisierten (hoher Designanteil) und wissensintensiven (Nischen-)Produkten vorzudringen. Neue Unternehmen können sich auch nur auf die Komponentenentwicklung und -konstruktion industrieller Bauteilen beschränken, da die digitalen Fertigungsvorlagen über das Internet weltweit vertrieben und die Bauteile vor Ort additiv hergestellt werden können (Thiesse et al. 2015, S. 142).

Unternehmen aus der Zulieferindustrie sind aus einem weiteren Grund vor Herausforderungen gestellt: Additive Fertigungsverfahren erlauben es, vormals aus vielen (konventionell hergestellten) Einzelkomponenten zusammengesetzte Erzeugnisse neu in einem einzigen Stück zu fertigen. Endhersteller erhalten dadurch die Möglichkeit, den Anteil der Eigenfertigung sukzessive zu erhöhen, um den Montage- und Logistikaufwand sowie die Abhängigkeit von Komponentenzulieferern zu verringern. Die Reduktion der Anzahl der Stufen in der Produktionskette würde Komponentenzulieferern zunehmend die Geschäftsgrundlage entziehen (These 6 in Kap. IV.2).

Die additive Fertigung wird daher oft als potenzielle Bedrohung für die etablierten, konventionell ausgerichteten Produzenten wahrgenommen, deren weitere Verbreitung zu beträchtlichen Verschiebungen in den heute bekannten Akteurskonstellationen des produzierenden Gewerbes führen könnte. Hierbei zu berücksichtigen ist allerdings auch, dass den etablierten Produzenten vielfältige Möglichkeiten offenstehen, ihre Geschäftsmodelle an die veränderten Rahmenbedingungen anzupassen. Um ihre Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten und gegebenenfalls zu steigern, können beispielsweise Komponentenzulieferer die additive Fertigung in Verbindung mit ihrem spezifischen Bauteilwissen dazu nutzen, um die von ihnen angebotenen Produkte mit verbesserten Eigenschaf-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

ten auszustatten. Auch können sie mit einer Verschiebung ihres Kerngeschäfts in Richtung Dienstleistungen reagieren und anstelle von physischen Bauteilen nur noch die entsprechenden digitalen Fertigungsvorlagen und/oder damit verknüpfte wissensintensive Leistungen anbieten (Fraunhofer ISI 2016, S. 55). Für den Erfolg solcher Geschäftsmodelle spricht, dass die additive Fertigung ein hohes Maß an spezifischem Konstruktionswissen erfordert, das viele Endhersteller intern nicht vorhalten wollen bzw. können (These 6 in Kap. IV.2). Weil der Einstieg in die additive Fertigung vergleichsweise niedrigschwellig ist, können schließlich auch kleinere Betriebe aus dem klassischen Handwerk von der additiven Fertigung profitieren, um ihr Produktangebot um additiv gefertigte Erzeugnisse oder damit verknüpfte Dienstleistungen zu erweitern.

Die Frage, ob die additive Fertigung für etablierte, konventionell ausgerichtete Produzenten eher ein Risiko darstellt oder vielmehr neue Chancen bietet, lässt sich somit nur für jedes einzelne Unternehmen beantworten und hängt entscheidend davon ab, ob das Unternehmen rechtzeitig auf die sich abzeichnenden Veränderungen reagiert und es ihm gelingt, die Möglichkeiten der additiven Fertigung für sich zu nutzen. Für seriöse Prognosen zur weiteren Entwicklung ist es gegenwärtig noch zu früh. Vor dem Hintergrund allerdings, dass viele Unternehmen bei der Identifikation von Anwendungspotenzialen der additiven Fertigung Schwierigkeiten haben könnten (These 11 in Kap. IV.2), wären entsprechende politische Unterstützungsmaßnahmen in diesem Zusammenhang von Nutzen. Zwar kann angeführt werden, dass das, was für die einen (hier: etablierte Hersteller) von Nachteil ist, für andere (hier: neue Unternehmen) von Vorteil. Aus industriepolitischer Sicht zu bedenken ist aber, dass Letztere nicht unbedingt hierzulande angesiedelt sein müssen, was mittel- bis langfristig Deutschlands Position als einer der weltweit bedeutendsten Produktionsstandorte gefährden könnte.

Verlagerung der Produktion 1.2

Es besteht die Vermutung, dass additive Fertigungsverfahren Unternehmen dazu motivieren, ihre vormals in Ländern mit geringeren Lohnkosten ausgelagerten Produktionsschritte künftig wieder zurück ins eigene Unternehmen zu holen (sogenanntes Reshoring). Zurückgeführt wird dies zum einen auf die Möglichkeiten zur Automatisierung manueller Arbeitsschritte in der Einzel- und Kleinserienfertigung (Kap. IV.1.1), durch welche die relative Bedeutung der Lohnkosten sinken könnte. Zum zweiten könnte es zur Realisierung der neuen Möglichkeiten für eine kundenindividuelle Produktion (Kap. IV.1.1) von Vorteil sein, die Produktion (wieder) nahe an den Käufermärkten anzusiedeln (EFI 2015, S. 78). In einem möglichen Beitrag zu einer Reindustrialisierung der eige-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

nen Wirtschaft sehen einige Länder denn auch einen der wichtigsten Gründe für umfangreiche Forschungsinvestitionen in die additive Fertigung, z.B. die USA (Kap. IV.1.3).

Ob bzw. in welchem Ausmaß die additive Fertigung die industrielle Warenproduktion in Hochlohnländern wiederbeleben kann, ist zurzeit allerdings nicht seriös vorherzusagen. Denn es könnte auch der gegenteilige Effekt eintreten, wonach die additive Fertigung die Verlagerung der Warenproduktion aus den Industrienationen in die Schwellenländer sogar noch weiter verstärkt. So könnten technologisch bisher weniger fortschrittliche Länder vom vergleichsweise niedrigschwelligen Einstieg in die additive Fertigung (im Vergleich zu konventionellen Methoden) profitieren, um ihren Rückstand zu den Industrieländern schneller aufzuholen und zügig neue industrielle Fertigungskapazitäten aufzubauen (Fraunhofer ISI 2016, S.61). Komplexe und qualitativ hochwertige Bauteile, die bisher noch weitgehend in den Industrienationen produziert werden, könnten dann künftig in wachsendem Maße auch in Schwellenländern hergestellt werden (insbesondere die lokale Produktion von Ersatzteilen kann hierfür ein Modell sein, Kap. V.1.3). China beispielsweise betrachtet die additive Fertigung als eine treibende Kraft bei der Umgestaltung des eigenen Produktionssektors hin zur hochtechnologischen High-End-Fertigung (EOS 2015; Kap. IV.1.3).[62] Diese Entwicklung wäre gerade für den in Deutschland sehr stark aufgestellten Produktionssektor mit seinen zahlreichen, nicht selten technologisch weltweit führenden Unternehmen mit großen Nachteilen verbunden.

Auswirkungen auf Produktionskonzepte und Logistik 1.3

Bei der additiven Fertigung sind alle wesentlichen Produkteigenschaften und Fabrikationsanweisungen in der digitalen Fertigungsvorlage enthalten, der physische Bauvorgang erfolgt gleichsam automatisch in der Produktionsanlage. Weil solche Anlagen prinzipiell überall stehen und von geschulten Fachkräften bedient werden können, kann die Fertigung dort erfolgen, wo die Bauteile hauptsächlich benötigt werden, z.B. in der nächstgelegenen Unternehmensfiliale, bei einem Auftragsfertiger, beim lokalen Händler oder auch direkt beim gewerblichen Kunden (z.B. beim Endhersteller) bzw. im Fall des privaten 3-D-Drucks beim Endverbraucher zu Hause bzw. im nächstgelegenen FabLab. Über größere Distanzen hinweg müssen Güter dann nicht mehr physisch, sondern können in digitaler Form über das Internet transportiert werden.

62 Für die Hersteller von additiven Fertigungsanlagen gehört das Land dementsprechend zu den wichtigsten Wachstumsmärkten. EOS (2015) beispielsweise verkaufte 2010 noch 10, 2015 bereits über 130 additive Fertigungsanlagen nach China.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Die additive Produktion kann nicht nur näher beim Kunden erfolgen, sondern auch sehr flexibel an die Nachfrage angepasst werden. Denn mit ein und derselben additiven Fertigungsanlage lassen sich problemlos die verschiedensten Erzeugnisse oder Produktvarianten aufeinanderfolgend herstellen. In der konventionellen Produktion erfordern Produkt- oder Produktionsänderungen hingegen meist aufwendige Werkzeug-, Maschinen- und Anlagenumrüstungen, weswegen in der Regel auf Vorrat produziert wird, was Lagerkosten verursacht und zu Überproduktionen führen kann.

Perspektivisch könnte die additive Fertigung – zumindest in Gütermärkten, in denen komplexe Bauteile und/oder kundenindividuelle Produkte nachgefragt werden – folglich dazu führen, dass die vorherrschenden Produktionsstrukturen (zentrale Produktionsstandorte, Produktion auf Lager, Verteilung der Ware über Zentrallager in die Käufermärkte) zunehmend durch dezentrale Produktionskonzepte abgelöst werden, also durch viele kleine, geografisch breitgestreute Produktionsstandorte, die eine flexible und bedarfsorientierte Produktion für regionale Kunden erlauben und ohne große Lager- und Transportkapazitäten auskommen (Gebhardt et al. 2015, S. 65 f.). Damit einhergehende wirtschaftliche Vorteile lassen sich am Beispiel der Ersatzteilproduktion illustrieren: Hersteller langlebiger Produkte (Fahrzeuge, Produktionsmaschinen, Haushaltsgeräte etc.), die die Ersatzteilverfügbarkeit auch nach Auslaufen der Produktion eines Modells garantieren, müssen solche Ersatzteile (bzw. die Werkzeuge für deren Herstellung) gegenwärtig in riesigen Lagerhallen über lange Zeiträume vorhalten (VDI 2016, S. 18). Oft müssen Ersatzteile zudem über lange Strecken zum defekten Gerät transportiert werden (u.a. in der Luftfahrt). Bei einer additiven Ersatzteilproduktion könnten diese nicht nur nach Bedarf, sondern auch gleich direkt vor Ort hergestellt werden. Anstelle einer umfangreichen Ersatzteillogistik müssten Hersteller nur noch einen Computerserver unterhalten, auf dem die jeweiligen digitalen Fertigungsvorlagen gespeichert sind.

Mögliche Folgen einer weitreichenden Dezentralisierung des materiellen Produktionssektors (zumindest im Bereich der komplexen oder individuellen Produkte) können gegenwärtig nur vermutet werden. Was die Akteursstrukturen in den betroffenen Gütermärkten angeht, könnten die etablierten Produzenten davon zwar profitieren (Reduktion der Lager- und Transportkosten, Wettbewerbsvorteile durch flexiblere Lieferungen und Kundennähe etc.), allerdings wäre dafür ein massiver Umbau ihrer bisherigen Produktions- und Vertriebsstrategien erforderlich, was außerordentlich kosten- und zeitintensiv und infolgedessen wohl auch mit erheblichen wirtschaftlichen Risiken verbunden wäre. Möglicherweise könnten hier junge bzw. neue Unternehmen, deren Geschäftsmodelle von Anfang an auf dezentrale additive Produktionsstrategien abstellen, gegenüber den etablierten Herstellern im Vorteil sein, zumal sie viel schneller und flexibler agieren können. Wie wahrscheinlich ein solcherart induzierter

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Akteurswandel im produzierenden Gewerbe ist, welche Ausmaße er annähme und welche Auswirkungen etwa für die Beschäftigten zu erwarten wären – diese Fragen müssen weiter erforscht werden.

Von einer dezentralisierten additiven Produktion wäre zweifellos auch die Logistikbranche betroffen. Im Falle der zentralen, konventionellen Produktionsstrukturen sind die gefertigten Waren meist über lange Distanzen und mehrstufige Logistiksysteme zum Kunden zu transportieren, die Produktionsstandorte wiederum müssen mit Rohstoffen und – bei mehrgliedrigen Produktionsketten – mit Halbzeugen und Zulieferprodukten versorgt werden. Im Falle einer dezentralen additiven Produktion hingegen dürfte sich der Logistikaufwand hauptsächlich auf den Rohstofftransport zwischen den Rohstoffproduzenten und den lokalen Produktionsstandorten beschränken, da zum einen die Güter in Kundennähe gefertigt werden, zum anderen die Anzahl der Stufen in der Produktionskette tendenziell abnimmt, zumal die additive Fertigung ohne Halbzeuge und gegebenenfalls ohne Zulieferprodukte auskommt (Kap. V.1.1). Infolgedessen dürfte sich nicht nur das Transportvolumen (gemessen in tkm) reduzieren, sondern auch die Komplexität der Logistiksysteme verringern, da der Transport homogener Rohstoffe grundsätzlich andere Anforderungen an die Logistik stellt als jener von hochdiversifizierten Gütern (beispielsweise ist eine Anlieferung in größeren Mengen oder der Transport mit langsameren Verkehrsmitteln wie Schiff oder Bahn anstelle von Flugzeugen möglich). Die konkreten Wirkungen und Folgen dezentraler additiver Produktionsstrukturen auf die etablierten Logistiksysteme sind noch weitgehend unbekannt und hängen wesentlich von den Einzelheiten der betrachteten Produktionsszenarien ab, etwa von der (künftigen) geografischen Verteilung der Rohstoffproduzenten (Petschow et al. 2014, S. 32 ff.).

Gleichwohl scheint die Logistikindustrie das Thema sehr ernst zu nehmen. Darauf deuten zumindest erste Reaktionen großer Logistikkonzerne hin, die neu auch Dienstleistungen im Bereich der additiven Fertigung anbieten. Der Logistikkonzern UPS beispielsweise betreibt in Louisville (USA) einen eigenen zentralen additiven Anlagenpark, zudem werden immer mehr Filialen in den USA mit additiven Fertigungsanlagen ausgestattet (UPS 2016). Auch DHL (2016) beschäftigt sich mit den Implikationen der additiven Fertigung auf die weltweiten Lieferketten und lotet mögliche Vorteile der Technologie für den Konzern aus. Es ist nicht unwahrscheinlich, dass vor allem Logistikunternehmen zu zentralen Treibern für die Herausbildung dezentraler additiver Produktionsstrukturen werden (Leupold/Glossner 2016, S. 48).

Noch weiter in die Zukunft gerichtete Überlegungen sehen die Entwicklung eines engmaschigen Verbunds an miteinander vernetzten, dezentralen und offen strukturierten additiven Entwicklungs- und/oder Produktionsstandorten voraus, die von Unternehmen wie auch von Privatpersonen betrieben werden und

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

so ein hochkomplexes Wertschöpfungsgefüge bilden. Durch ein solches Netzwerk könnten Produzenten fehlende Fertigungskapazitäten und/oder Konstruktionskenntnisse über Onlineplattformen nachfragen und zukaufen, umgekehrt könnten Konstrukteure und Anlagenbetreiber überschüssige Kapazitäten anbieten (VDI/VDE-IT 2015, S. 37). Frühe Ansätze in diese Richtung gibt es bereits. Auf der Onlineplattform 3D Hubs[63] beispielsweise können sich private Besitzer von 3-D-Druckern als Hub registrieren. Nutzer ohne 3-D-Drucker buchen gegen eine Gebühr Druckkapazitäten. Die gedruckten Erzeugnisse werden dann entweder vor Ort abgeholt oder zugeschickt (Gebhardt et al. 2015, S. 59).

Arbeitsplatz- und Beschäftigungseffekte 1.4

In der manuellen Produktion können additive Fertigungsverfahren viele anfallende Arbeitsschritte durch einen automatisierten maschinellen Ablauf ersetzen (Kap. IV.1.1). In der Regel wird die Automatisierung von Produktionsprozessen mit Arbeitsplatzverlusten assoziiert, da die zuvor mit diesen Tätigkeiten betrauten Facharbeiter nicht länger benötigt werden (vgl. Diskussion zur Robotik). Allerdings findet nicht bloß eine Substitution von manuellen durch maschinelle Abläufe statt, sondern es werden einfachere Arbeiten durch höherqualifizierte Tätigkeiten ersetzt, die unter Zuhilfenahme von Maschinen erledigt werden (dazu und zum Folgenden Gebhardt et al. 2015, S. 114 f.). Inwieweit die Verbreitung der additiven Fertigung zu Arbeitsplatzverlusten im produzierenden Sektor führt, hängt damit wesentlich von zwei Faktoren ab, nämlich,

- ob erstens die vorhandenen, bisher in der konventionellen Fertigung eingesetzten Fachkräfte in der Lage sind, sich die neuen Fertigungsverfahren anzueignen und
- ob zweitens durch die damit erzielten Effizienzsteigerungen in der Fertigung die zuvor von vielen Fachkräften geleistete Arbeit nun von einigen wenigen erledigt werden kann.

Der erste Faktor ist eng mit der Frage verknüpft, welche spezifischen Anforderungen die additive Fertigung an die Qualifikationen der damit befassten Mitarbeiter stellt und welche Qualifizierungsmöglichkeiten ihnen offenstehen, sich diese Kompetenzen anzueignen (dazu Kap. V.1.5). Hierbei spielen auch bereits vorhandene Kompetenzen eine Rolle, auf denen gegebenenfalls aufgebaut werden kann und die abhängig vom jeweiligen Beruf sind. Beispielsweise dürfte der Umstieg auf additive Fertigungsverfahren einem Facharbeiter, der bisher computergesteuerte 5-Achs-Fräsmaschinen bedient hat und im Umgang mit CAD-

63 www.3dhubs.com (9.12.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Dateien und -Programmen geübt ist, viel leichter fallen als einem Beschäftigten, der bisher hauptsächlich mit handgeführten Werkzeugen und manuell zu bedienenden Maschinen gearbeitet hat (Gebhardt et al. 2015, S. 85). Von Bedeutung dürfte schließlich die individuelle Bereitschaft der Beschäftigten sein, sich auf die neuen Fertigungsverfahren einzulassen. Insbesondere bei Facharbeitern, die bislang einen Großteil ihres Berufslebens in der manuellen Produktion tätig gewesen sind, könnte die additive Fertigung mit ihrem Schwerpunkt auf Bildschirmarbeit und Anlagensteuerung ein Gefühl der Entfremdung von ihrer Arbeit auslösen. Die Frage, ob ein Unternehmen im Zuge der Einführung der additiven Fertigung die vorhandenen Mitarbeiter weiter beschäftigen kann, lässt sich damit nicht generell, sondern bestenfalls branchenspezifisch bzw. eigentlich nur im Einzelfall für jedes Unternehmen beantworten. Bisher fehlt es an Untersuchungen, die für die verschiedenen betroffenen Berufe systematisch die hier vorhandenen Qualifikationen mit den Anforderungen der additiven Fertigung vergleichen, um daraus spezifische Qualifizierungsbedarfe abzuleiten.

Wie allerdings Gebhardt et al. (2015, S. 105 ff.) anhand von zwei betrieblichen Fallstudien festgestellt haben (Kasten), scheinen Unternehmen nicht selten den einfachsten Weg zu gehen, indem sie das für die additive Fertigung erforderliche Personal extern rekrutieren (z.B. durch Abwerben von Mitarbeitern der Anlagenhersteller). In einem der beiden Fälle wurde der so erworbene Sachverstand dann aber für interne Qualifizierungsmaßnahmen eingesetzt, um den weiteren Personalbedarf für die additive Fertigung soweit wie möglich durch bestehende Personalressourcen zu decken.

Beim zweiten Faktor geht es um die Frage, ob infolge der additiven Fertigung insgesamt weniger Beschäftigte im produzierenden Sektor benötigt werden. Zu beachten ist zunächst, dass zwar durch Effizienzgewinne beim Arbeitsschritt der Bauteilherstellung der Personalbedarf abnehmen kann. Allerdings kann dies in vor- und nachgelagerten Arbeitsschritten auch wieder kompensiert werden. Beim gegenwärtigen Stand der Technik und abhängig vom eingesetzten Verfahren sind beispielsweise noch vielfältige manuelle Tätigkeiten in der Vor- und Nachbearbeitung zu verrichten (Materialhandhabung, Entnahme des Bauteils aus dem Bauraum, Entfernen von Stützstrukturen oder Pulverresten, Oberflächenveredlung etc.) sowie aufwendige händische Qualitätskontrollen vonnöten (Kap. III.6). In dem Maße, wie auch diese Arbeitsschritte künftig automatisiert werden (können), dürften die Auswirkungen eines breiten Einsatzes von additiven Fertigungsverfahren auf die Beschäftigungszahlen in der Produktion an Relevanz zunehmen. Zu berücksichtigen ist ferner, dass bei Entscheidungen zur Einführung der additiven Fertigung nicht alleine Effizienzerwägungen eine Rolle spielen, sondern auch die Möglichkeiten für Produktverbesserungen und attraktivere Dienstleistungen (z.B. schnellere Lieferzeiten, individuelle Produkte). Negative Beschäftigungseffekte infolge von Effizienzgewinnen können daher

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

durch die steigende Nachfrage nach additiv gefertigten Produkten kompensiert werden (Kasten). Sobald aber die entsprechenden Märkte eine Sättigung erreichen, muss bei weiteren Effizienzfortschritten mit einem geringeren Bedarf an Produktionsbeschäftigten gerechnet werden (Gebhardt et al. 2015, S. 115).

Betriebliche Fallstudien von Gebhardt et al. (2015)

Im Rahmen ihrer Untersuchung zu möglichen Auswirkungen der additiven Fertigung auf die Beschäftigten haben Gebhardt et al. (2015, S. 105 ff.) zwei betriebliche Fallstudien durchgeführt. Hier einige zentrale Erkenntnisse:

Fallstudie Gießerei (rund 130 Mitarbeiter): Gründe für die Anschaffung einer additiven Fertigungsanlage (3-D-Druckverfahren, Kap. III.2.3) waren u.a. Kosteneinsparungen, die Beschleunigung der Produktion und die Möglichkeiten für neue Formen. Der Bereich der additiven Fertigung wurde organisatorisch, räumlich und personell von der klassischen Produktion der Gießerei getrennt. Ein Arbeitsplatz wurde neu geschaffen und mit einem hochqualifizierten, extern rekrutierten Mitarbeiter besetzt. Es fand bisher keine Substitution bestehender Herstellungsschritte in der klassischen Produktion statt, vielmehr profitierte diese davon, da zusätzlich Aufgaben in der Nachbearbeitung additiv gefertigter Produkte und der Vorbereitung additiv gefertigte Formen für die Weiterverarbeitung in der Gießerei anfallen.

Fallstudie Hörgerätehersteller (bis zu 50 Mitarbeiter): Das Unternehmen produziert Ohrschalen für Hörgeräte. Grund für die Anschaffung von drei additiven Fertigungsanlagen (Stereolithografie, Kap. III.2.2) war das Bestreben, am technischen Fortschritt teilzuhaben und nicht den Anschluss zu verlieren. Hohe Effizienzsteigerungen konnten erzielt werden: Mit einer additiven Fertigungsanlage lassen sich innerhalb von 10 Stunden rund 200 individuelle Ohrpassstücke gleichzeitig herstellen, von Hand gefertigt benötigt ein Facharbeiter dafür mindestens 33 Stunden. Anstelle von Facharbeitern zum Fräsen oder Schleifen von Rohlingen war höherqualifiziertes Personal für die Vorbereitung der digitalen Fertigungsvorlagen und Bedienung der additiven Fertigungsanlage erforderlich. Dazu wurde eine betriebsfremde Mitarbeiterin eingestellt, die sodann – soweit möglich – Betriebsangehörige in die neuen Arbeitsabläufe einwies. Die internen Qualifizierungsmaßnahmen wurden bei Bedarf durch externe Schulungen bei Anlagen- und Softwareherstellern ergänzt. Aufgrund des hohen Marktwachstums im Bereich Hörgeräte bestand für das Unternehmen bisher kein Bedarf, Rationalisierungsgewinne durch die additive Fertigung für einen Personalabbau zu nutzen.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

In internationaler Perspektive bleibt in Bezug auf mögliche Beschäftigungseffekte abzuwarten, ob die additive Fertigung eher zu Rückverlagerungseffekten führt und damit zur Stärkung des hiesigen Produktionssektors beitragen kann oder ob sich vielmehr der Wettbewerbsdruck auf deutsche Produzenten sukzessive erhöht, weil ausländische Produzenten mithilfe der additiven Fertigung ihren Rückstand zu Deutschland rasch wettmachen können (Kap. V.1.2). Hinzu kommen branchenspezifische Effekte. Der Einsatz der additiven Fertigung in der deutschen Dentalbranche beispielsweise kann durch damit ermöglichte Qualitätsverbesserungen beim Zahnersatz und in der Behandlung (u.a. schnellere Behandlungszeiten) sowie durch Kosteneinsparungen zur Eindämmung des Phänomens des Dentaltourismus in kostengünstigere Angebotsländer beitragen (Gebhardt et al. 2015, S. 49 f.).

Qualifizierungsbedarfe und -möglichkeiten 1.5

Erforderliche Kompetenzen und Qualifikationen

Produktentwickler und Konstrukteure müssen nicht erst im Zusammenhang mit der additiven Fertigung über ein hervorragendes räumliches Vorstellungsvermögen verfügen und den Umgang mit CAD-Konstruktionssoftware beherrschen (z.B. werden konventionelle CNC-Fräsmaschinen auch mit CAD-Daten angesteuert). Während aber konventionelle Fertigungsverfahren die gestalterischen Freiheiten der Entwickler oft stark einschränken und diese zu fertigungsgerechten Konstruktionen zwingen, gelten bei additiven Fertigungsverfahren wesentlich weniger geometrische Restriktionen, sodass nicht die Fertigung, sondern hauptsächlich dessen Funktion die Form eines Bauteils bestimmt (VDI 2016, S. 31 f.). Um von den neuen Freiheiten profitieren zu können, muss ein Umdenken und Umlernen bei Entwicklern und Konstrukteuren stattfinden. Dies dürfte nicht jedem leichtfallen, da Erlerntes überwunden, neue Konstruktionsansätze gewagt und eine höhere Bauteilkomplexität beherrscht werden müssen. Darüber hinaus sind nicht nur Informationen zur Bauteilgeometrie, sondern auch die wesentlichen Fabrikationsmerkmale in der digitalen Fertigungsvorlage enthalten. Mehr noch als in der konventionellen Fertigung müssen Entwickler und Konstrukteure deshalb die Prinzipien und Besonderheiten der jeweiligen additiven Fertigungsverfahren kennen und über gute Materialkenntnisse verfügen, um mögliche Fehlerquellen zu vermeiden (z.B. fehlende Stützstrukturen, Werkstoffveränderungen oder -verformungen während und nach der Fertigung, Kap. III.6). Entsprechend besteht laut VDI (2016, S. 32) noch ein großer Schulungs- und Fortbildungsbedarf, bis die additive Fertigung bei Pro-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

duktentwicklern und Konstrukteuren als selbstverständliche Fertigungsoptionen etabliert sein wird.

Was die physische Fertigung angeht, müssen Produktionsbeschäftigte über anlagen- und verfahrensspezifische Kenntnisse verfügen (Aufbau und Inbetriebnahme, Bedienung, Prozessüberwachung, Werkstoffmanagement, Wartung, Arbeitssicherheit etc.), die in der Regel durch Schulungsangebote der Anlagenhersteller vermittelt werden. Sie müssen den gesamten additiven Fertigungsablauf planen, steuern und – sofern erforderlich – so gut wie möglich in die bestehenden konventionellen Produktionsabläufe integrieren können. Sie sollten Grundkenntnisse im Bereich Konstruktion besitzen, den Umgang mit CAD-Daten beherrschen sowie generell über ein gutes räumliches Vorstellungsvermögen verfügen. Da die Reproduzierbarkeit oft noch eine große Herausforderung bei der additiven Fertigung darstellt (Kap. III.6), müssen die eingesetzten Fachkräfte schließlich in der Lage sein, Fehler und Qualitätsmängel in den gefertigten Produkten zu erkennen, mögliche Ursachen zu eruieren und diese durch Einstellen der Prozessparameter zu beheben. Dies erfordert nicht nur ein ausgezeichnetes Prozessverständnis und hervorragende Materialkenntnisse, sondern auch ein gutes Auge und manuelle Fertigkeiten. Viele dieser Kompetenzen sind nicht durch Schulungen vermittelbar, sondern müssen von den Anlagenbedienern selbstständig in der Praxis erworben werden.

Da additive Fertigungsverfahren ihr Einsatzpotenzial vor allem auch in der kundenindividuellen Produktion haben, die einen intensiven wechselseitigen Austausch zwischen Kunde und Produzent bedingt, müssen Konstrukteure und Anlagenbediener schließlich über kommunikative und – zumindest ansatzweise – kaufmännische Kompetenzen verfügen (Gebhardt et al. 2015, S. 85).

Qualifizierungsmöglichkeiten

Gegenwärtig gibt es keinen nach Berufsbildungsgesetz bzw. Handwerksordnung geregelten Ausbildungs- oder Fortbildungsberuf zu additiven Fertigungsverfahren (dazu und zum Folgenden auch Gebhardt et al. 2015, S. 87 ff.). Entsprechend handelt es sich bei den mit der additiven Fertigung betrauten Fachkräften um Quereinsteiger, die an konventionellen Fertigungsverfahren ausgebildet wurden und sich die erforderlichen Kompetenzen im Betrieb selbst angeeignet haben, unterstützt durch externe Schulungen oder Seminare, welche meist von den Anlagenherstellern und gelegentlich von Forschungseinrichtungen (z.B. dem Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM) oder regionalen Handelskammern[64] angeboten werden.

64 Hierbei handelt es sich aber in der Regel um Überblicksveranstaltungen und allgemeine Einführungen in das Thema.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Für Fachkräfte gibt es erst in jüngster Zeit und nur vereinzelt Weiterbildungsmöglichkeiten im Rahmen von formalisierten Lehrgängen mit Zertifikatabschluss. Im Sommer 2016 beispielsweise bot die LZH Laser Akademie GmbH als bundesweit erste Weiterbildungsakademie einen fünftätigen Lehrgang »Fachkraft für additive Fertigungsverfahren – Fachrichtung Metall« an, der vom DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. entwickelt und zertifiziert wurde.[65] Zum Sommersemester 2017 startete an der Hochschule Schmalkalden der erste berufsbegleitende Studiengang zur additiven Fertigung. Die zweisemestrige Weiterbildung zum »Anwendungstechniker (FH) für Additive Verfahren/Rapid-Technologien« richtet sich vor allem an technische Fachkräfte kleiner und mittelständischer Unternehmen.[66]

Zu diskutieren ist, ob ein eigener Ausbildungsberuf zur additiven Fertigung entwickelt werden sollte, etwa ein »Verfahrensmechaniker additive Fertigung«. Angesichts ihrer zunehmenden Bedeutung könnte dies einem unter Umständen drohenden Fachkräftemangel vorbeugen und zugleich zur weiteren Verbreitung der Technologie beitragen (Radig 2015). Gegen einen eigenständigen Ausbildungsberuf spricht allerdings der Umstand, dass – abgesehen vom Bereich Konstruktion – die erforderlichen Qualifikationen aufgrund der Heterogenität der Verfahren, Materialien, Produkteigenschaften und involvierten Branchen je nach Anwendungsfeld sehr unterschiedlich ausfallen (Gebhardt et al. 2015, S. 88).

Insofern könnte es sich gegebenenfalls als zielführender erweisen, für bereits bestehende Ausbildungsberufe mit Berührungspunkten zur additiven Fertigung relevante Lerninhalte in die entsprechenden Rahmenlehrpläne und Ausbildungsordnungen aufzunehmen. Dies ist bisher nur für einige wenige Ausbildungsberufe (z.B. Technischer Modellbauer) und oft auch nur punktuell bzw. unsystematisch erfolgt (z.B. Produktionstechnologe, Technischer Produktdesigner, Gießereimechaniker). Für zahlreiche weitere Berufe mit Bezügen zur additiven Fertigung (z.B. Fertigungsmechaniker, Feinwerkmechaniker, Metallbauer, Zahntechniker) finden sich keine entsprechenden Hinweise bzw. Lerninhalte. Dies liegt an der grundsätzlich technik- und verfahrensoffenen Formulierung der Ausbildungsordnungen und Rahmenlehrpläne (Gebhardt et al. 2015, S. 89). Unter dieser Prämisse allerdings dürfte es schwierig sein, die in vielen Branchen noch relativ unbekannte Fertigungstechnologie überhaupt ins Bewusstsein der Lehrkräfte und Auszubildenden zu bringen.

Die Initiative, die additive Fertigung stärker bzw. überhaupt in den Ausbildungsordnungen und Rahmenlehrplänen zu verankern, könnte von den jeweiligen Fachverbänden oder dem BIBB ausgehen. Dass diese Akteure bisher nicht

65 www.lzh-laser-akademie.de/fachkraft-fuer-additive-fertigungsverfahren-metall.html (7.12.2016)

66 www.k-zeitung.de/erster-studiengang-fuer-additive-fertigungsverfahren/150/4368/97026 (7.12.2016)

stärker aktiv wurden, dürfte mit dem noch geringen Verbreitungsgrad der additiven Fertigung zusammenhängen. Denn die meisten Unternehmen wären derzeit gar nicht in der Lage, die entsprechende Ausbildungsinhalte (und vor allem die Praxiserfahrung) im eigenen Betrieb zu vermitteln. Da überbetriebliche Ausbildungsstätten (ÜBS) – sofern sie denn zur Verfügung stehen[67] – (noch) nicht mit den erforderlichen Gerätschaften und fachkundigen Lehrkräften ausgestattet sind, müssten die Auszubildenden im Rahmen von Unternehmenskooperationen in andere Betriebe entsendet werden, die additive Fertigungsverfahren bereits anwenden. Deren Kooperationsbereitschaft dürfte jedoch gering sein, da sie Gefahr liefen, ihr Know-how und damit ihren Wettbewerbsvorsprung an andere Unternehmen zu verlieren. Hier müssten die Unternehmen davon überzeugt werden (z.B. durch Fachverbände oder die Politik), dass die Erweiterung der Ausbildungsordnungen der Fachkräftesicherung dienen würde, was der ganzen Branche und somit zumindest indirekt auch dem eigenen Unternehmen zugutekäme (Gebhardt et al. 2015, S. 90). In diesem Zusammenhang ist die im Sommer 2016 gestartete Initiative »Berufsbildung 4.0« des BMBF zu begrüßen, in deren Rahmen u.a. die Anschaffung von 3-D-Druckern in ÜBS gefördert werden soll (BMBF 2016a, S. 15). Diesbezüglich ist es wichtig, dass ÜBS auch mit leistungsstarken (und entsprechend teuren) additiven Fertigungsanlagen für industrielle Anwendungen ausgestattet werden.

Auch im Bereich der Hochschulbildung gibt es bislang keine spezialisierten Studiengänge, welche angehende Ingenieure und Konstrukteure schwerpunktmäßig im Bereich der additiven Fertigung ausbilden (Gebhardt et al. 2015, S. 87). Mittlerweile entwickeln jedoch immer mehr Universitäten, Hochschulen oder Fachhochschulen diverse Lehrangebote zur additiven Fertigung, die allerdings in Bezug auf Inhalt und Umfang sehr heterogen sind. Das Spektrum reicht von der knappen thematischen Einführung im Rahmen von Grundvorlesungen zu Fertigungstechniken über spezifische, allerdings außerhalb des regulären Curriculums verortete Vorlesungen an einzelnen Lehrstühlen bis hin zu Schwerpunktsetzungen in Lehre und Forschung auf die additive Fertigung meist unter Beteiligung mehrerer Lehrstühle und in Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen und weiteren Forschungseinrichtungen. Beispiele für Letztere sind die Universitäten Duisburg-Essen[68], Nürnberg-Erlangen[69], Paderborn[70] oder die Fachhochschule Aachen[71].

67 Laut Gebhardt et al. (2015, S. 90) bestehen in der Industrie keine überbetrieblichen Ausbildungsstätten.
68 www.uni-due.de/fertigungstechnik/index.php (8.12.2016)
69 www.sfb814.forschung.uni-erlangen.de/index.shtml (8.12.2016)
70 https://dmrc.uni-paderborn.de/de (8.12.2016)
71 www.goethelab.fh-aachen.de (8.12.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Zwar kann davon ausgegangen werden, dass Lehrangebote zur additiven Fertigung an Hochschulen auf Initiative engagierter Lehrenden und/oder Studierenden kontinuierlich ausgebaut und zunehmend flächendeckend angeboten werden. Auch dürften entsprechende Lehrangebote im Zuge der laufenden Normierung- und Standardisierungsprozesse bei der additiven Fertigung künftig stärker formalisiert und curricular verankert werden. Allerdings äußern Vertreter der Industrie immer wieder, dass dieser inneruniversitäre Prozess ohne äußere Impulse zu langsam ablaufen könnte, um angesichts der erwarteten rasanten Marktentwicklung genügend hochqualifizierte Fachkräfte auszubilden und die Entwicklungen in diesem Feld aktiv mitgestalten zu können.

Wirtschaftliche Auswirkungen des privaten 3-D-Drucks 1.6

Die Gestaltungsmacht der Konsumenten nimmt in vielen Teilen der Konsumgüterindustrie kontinuierlich zu. Dies zeigt sich im Trend der individualisierten industriellen Produktion, die immer stärker unmittelbar auf Kundenwünsche eingeht, genauso wie in der wachsenden Bedeutung von (hersteller- oder kundeninitiierten) offenen Innovationsprozessen, in deren Rahmen innovative Konsumenten auf diversen Onlineplattformen (z.B. in Blogs, Foren) ihre Bedürfnisse artikulieren und zugleich eigene Entwicklungsleistungen einbringen (z.B. TAB 2014). Bisher allerdings traten Konsumenten für gewöhnlich nur als *Kodesigner* in Erscheinung, sind aber, was die materielle Realisierung ihrer Produktwünsche und -ideen angeht, nach wie vor auf industrielle Warenproduzenten angewiesen. Damit einher geht eine für beide Seiten vorteilhafte Beziehung: Konsumenten sind motiviert, ihre schöpferischen Leistungen den Produzenten (ohne Gegenleistung) zur Verfügung zu stellen (weil sie sich davon bessere Produkte erhoffen), Produzenten greifen die Ideen und Lösungen der Konsumenten auf, um die Nutzerakzeptanz und Wettbewerbsfähigkeit ihrer Produkte zu steigern (Thiesse et al. 2015, S. 143).

Der private 3-D-Druck könnte diese Beziehung fundamental verändern, da der Konsument zusätzlich zum *Kohersteller* werden kann und somit nicht länger auf die industriellen Produzenten angewiesen ist, um seine Produktideen zu realisieren (Thiesse et al. 2015, S. 143). Das Szenario rückt in den Bereich des Vorstellbaren, dass 3-D-Drucker weit über die technikaffine Makerbewegung hinaus großflächige Verbreitung auch bei weniger technikversierten Privatanwendern finden, die künftig ihren Bedarf an diversen Alltagsprodukten (Geschirr, Einrichtungsgegenstände, Modeaccessoires, Ersatzteile etc.) im wachsenden Maße durch Eigenproduktion decken. Die industrielle Wertschöpfung würde sich in diesem Fall zunehmend weg vom materiellen Produkt auf Geräte, Software und Ausgangsmaterialen für den privaten 3-D-Druck und – sofern

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Produktinnovationen dann nicht größtenteils durch die Konsumenten entstehen – das Produktwissen in Form von digitalen Fertigungsvorlagen verschieben (Gebhardt et al. 2015, S. 55). Dies würde die Konsumgüterindustrie, wie sie heute besteht, vor enorme Herausforderungen stellen bzw. in Teilen existenziell bedrohen.

Es ist meistens dieses Szenario, das die enorme Faszination für das Thema 3-D-Druck in der breiten Öffentlichkeit speist. Ob und, wenn ja, wann und in welcher Ausprägung es Realität werden könnte, darüber sind zurzeit nur Spekulationen möglich, was umso mehr für die damit verbundenen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Auswirkungen gilt. Unabdingbare Voraussetzung ist, dass die für Privatpersonen erschwinglichen 3-D-Drucker in Bezug auf Leistungsfähigkeit, Bedienungsfreundlichkeit und Materialverfügbarkeit substanziell weiterentwickelt werden, denn mit der heute verfügbaren Technik können bestenfalls einfache Kunststofferzeugnisse hergestellt werden. Und sogar dies erfordert einigen Aufwand und technisches Geschick (Kap. II.2). Obschon die Geräte mit jeder Generation verbessert werden, dürfte es – wenn überhaupt – noch ein sehr weiter Weg sein, bis auch weniger technikaffine Privatpersonen in der Lage sein werden, hochqualitative Erzeugnisse selbstständig zu Hause herzustellen.

Selbst wenn fortschrittliche 3-D-Drucker dies einmal erlauben sollten, ist es unwahrscheinlich, dass der Konsument der Zukunft seinen Warenbedarf größtenteils durch Eigenproduktion decken wird. Denn für die allermeisten alltäglichen Produkte wäre der Nutzen sehr fraglich, etwa für einfache Gebrauchsartikel (z.B. Geschirr), Spielwaren (z.B. Steckbausteine) oder standardisierte Einrichtungsgegenstände (z.B. Vasen). Deren Herstellung mit einem 3-D-Drucker dürfte gegenüber der Beschaffung der Produkte (aus konventioneller Massenproduktion) im Handel nicht nur erheblich teurer, sondern auch mit einem höheren (Zeit-)Aufwand verbunden sein (beispielsweise werden auch keine Tageszeitungen zu Hause ausgedruckt, obwohl dies mit gewöhnlichen 2-D-Druckern prinzipiell möglich ist). Hinzu könnten ökologische Nachteile (Kap. V.2) und gesundheitliche Risiken kommen (Kap. V.3.1).

Viel realistischer erscheint daher das Szenario, dass die überwiegende Zahl der Nutzer 3-D-Drucker nur gelegentlich für spezielle Anwendungen einsetzt, etwa um auf Basis digitaler Fertigungsvorlagen aus dem Internet originelle Geschenke, individuelles Spielzeug oder einfache, schnell benötigte Ersatzteile zu fertigen. Konsumprodukte dürften demnach auch weiterhin größtenteils aus konventioneller Massenproduktion stammen und wie gewohnt vertrieben werden, selbst wenn künftig 3-D-Drucker millionenfach in privaten Haushalten stehen sollten.

Von dieser breiten Mehrheit an Gelegenheitsnutzern abzugrenzen wären jedoch innovative Privatanwender, die fortschrittliche 3-D-Drucker zur Reali-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

sierung ihrer Produktideen nicht nur zur eigenen Verwendung, sondern zunehmend auch für den (lokalen) Weiterverkauf am Markt einsetzen dürften. Dabei unterscheiden sich private Produzenten von den industriellen Herstellern dahingehend, dass ihr Handeln weniger von unternehmerischen Zielen (Gewinnmaximierung, Marktführerschaft) als vielmehr vom Streben nach den bestmöglichen Produkten geleitet wird. Zudem verfügen sie in der Regel über vielfältige persönliche Erfahrungen und Kenntnisse im Umgang mit den Produkten, weil diese oft Gegenstand ihrer Hobbys sind (Piller 2006; Thiesse et al. 2015, S. 144). Es ist daher nicht auszuschließen, dass in bestimmten Branchen (z.B. Sportartikel, Modeaccessoires, Computerhardware, Zubehör für Smartphones) etablierte Hersteller künftig einer wachsenden Zahl an privaten, hochinnovativen und sehr flexibel agierenden Wettbewerbern gegenüberstehen, die mit ihren Produkten die Konsumentenbedürfnisse zielgenau abdecken können. Es sprechen allerdings auch einige Gründe gegen eine solche Entwicklung (Thiesse et al. 2015, S. 144): Für viele Privatanwender dürften sich die Markteintrittshürden als zu hoch erweisen, denn als Produzenten stünden sie beispielsweise auch in der Pflicht, die gesetzlich geregelten Anforderungen an die Produktsicherheit einzuhalten, sowie in der haftungsrechtlichen Verantwortung für fehlerhafte Produkte (Kap. VI). Zudem dürften sie es in der Praxis schwer haben, auf Dauer gegen die etablierten Produzenten zu bestehen, weil ihnen die Ressourcen und kaufmännischen Kompetenzen für Werbung, Vertrieb oder Kundenservice fehlen. Und schließlich werden die etablierten Hersteller auf die neue Wettbewerbssituation mit eigenen, auf die additive Fertigung ausgerichteten Geschäfts- und Vertriebsmodellen reagieren, um die hier entstehenden Kundenbedürfnisse abzudecken (wie sich dies beispielsweise in Teilen der Spielwarenindustrie bereits heute abzeichnet, Kap. II.1.10). Dabei können etablierte Unternehmer von den Innovationsimpulsen der neuen Akteure gegebenenfalls auch profitieren, wenn es ihnen gelingt, sie in ihre Innovationsprozesse einzubinden (These 17, Kap. IV.2).

Generell aber sind die Entwicklungen zu neu und ihr weiterer Verlauf zu unsicher, um seriöse Zukunftsaussagen über die Auswirkungen des privaten 3-D-Drucks auf die Konsumgüterindustrie zu begründen. Es bleibt abzuwarten, ob sich das Phänomen des privaten 3-D-Drucks weiterhin so dynamisch weiterentwickelt oder ob es sich rückblickend nur als ein vorübergehender Hype erweist, nach welchem sich die Technik wieder weitgehend auf die Makerbewegung zurückzieht (Gebhardt et al. 2015, S. 58).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Ökologische Wirkungen der additiven Fertigung 2.

Additiven Fertigungsverfahren wird in der Regel eine positive Umweltwirkung zugeschrieben. Im Vergleich zu den konventionellen Produktionsmethoden sollen sie beispielsweise Materialeinsparungen ermöglichen, die Herstellung besonders leichter Bauteile erlauben oder zu einer Reduktion der globalen Warenströme beitragen können. Diesen (zumindest potenziell) positiven ökologischen Wirkungen sind jedoch möglicherweise nachteilige ökologische Effekte gegenüberzustellen, die sich u.a. in den vor- und nachgelagerten Bereichen der Produktion zeigen.

Positive ökologische Effekte 2.1

Gegenüber den konventionellen Produktionsmethoden können additive Fertigungsverfahren folgende ökologische Vorteile aufweisen (Petschow et al. 2014, S. 26 ff.; VDI/VDE-IT 2015, S. 40 f.):

- *Hohe Materialeffizienz im Fertigungsprozess*: Im Prinzip wird nur das Material benötigt, das tatsächlich im additiv gefertigten Bauteil verbaut wird. Im Gegensatz dazu entstehen bei den konventionellen (subtraktiven) Fertigungsverfahren Materialabfälle wie Späne oder sonstiger Verschnitt, die gegebenenfalls nur unter hohem Energieaufwand wiederverwertet werden können.
- Erschließung von *Leichtbaupotenzialen*: Neuartige Strukturen erlauben gewichtsreduzierte Bauteile für Flugzeuge, Autos etc. und ermöglichen somit Einsparungen beim Treibstoffverbrauch (Kap. II.1.3).
- *Transporteinsparungen durch Dezentralisierung der Produktion*: Durch die (bedarfsorientierte) Fertigung vor Ort lässt sich der Logistikaufwand reduzieren (Kap. V.1.3). Der Energieverbrauch, der Bedarf an Verpackungsmaterialien und transportbedingte Umweltschäden können dadurch verringert werden.
- *Reparatur von Verschleißteilen*: Bauteile, die nur partiell verschleißen, lassen sich mit additiven Fertigungsverfahren reparieren, ohne dass diese vollständig ausgetauscht werden müssen (Kap. II.1.2). Dadurch lässt sich gegebenenfalls der Ressourcenverbrauch für die Reparatur reduzieren.
- *Kein Werkzeugverschleiß, keine Kühl- oder Schmiermittel*: Weitere Ressourceneinsparungen ergeben sich aus dem Umstand, dass bei der additiven Fertigung kein Werkzeugverschleiß auftritt. Zudem gelangen bei einigen konventionellen Fertigungsverfahren (Bohren, Fräsen etc.) häufig umwelt-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

belastende Kühl- und/oder Schmiermittel zur Anwendung, deren fachgerechte Lagerung, Anwendung, Aufbereitung und Entsorgung aufwendig ist.

Negative ökologische Effekte 2.2

Zu den potenziellen negativen ökologischen Effekten der additiven Fertigungsverfahren im Vergleich zu konventionellen Verfahren zählen (Petschow et al. 2014, S. 26 ff.; VDI/VDE-IT 2015, S. 40 f.):

- *Materialabfälle in der Nachbearbeitung*: Die hohe Materialeffizienz im Fertigungsprozess kann durch Materialabfälle in der Nachbearbeitung wieder relativiert werden (z.B. Entfernung von Stützstrukturen, Oberflächenbehandlung durch Schleifen etc.). Bei pulverbasierten Verfahren kann das nicht verbaute Pulver in der Regel wiederverwendet werden, muss dazu aber aufbereitet werden, was in der Praxis zu Materialverlusten führt.
- *Höherer Energieverbrauch im Fertigungsprozess*: Vor allem für die laserbasierten additiven Fertigungsverfahren kann der Energiebedarf des Fertigungsprozesses den der meisten konventionellen Verfahren übersteigen. Darüber hinaus muss auch der Energieaufwand zur Herstellung der Ausgangsmaterialien berücksichtigt werden, der insbesondere für pulverförmige Werkstoffe hoch sein kann.
- *Materialverschwendung*: Vor allem im Privatbereich kann die additive Fertigung einen verschwenderischen Umgang mit Materialen und Produkten befördern. Nicht nur lassen sich damit immer neue Varianten eines Gegenstandes herstellen, auch dürften viele dieser Erzeugnisse von geringem Nutzen bzw. gänzlich sinnlos sein (sogenannte Crappy Objects) und daher schnell wieder entsorgt werden (dazu vergleichbar ist der Anstieg des Papierverbrauchs als Folge der Einführung von 2-D-Druckern für den Privatgebrauch). Auch die derzeit noch häufig vorkommenden Fehldrucke tragen zur Materialverschwendung bei.
- *Kürzere Lebensdauern der Produkte*: Durch die additive Fertigung gegebenenfalls erzielbare kürzere Innovationszyklen könnten zu kürzeren Produktlebenszyklen führen, was sich nachteilig auf deren Umweltbilanz auswirken könnte.
- *Recycling*: Das Recycling additiv gefertigter Erzeugnisse kann sich als problematisch erweisen, da diese im Gegensatz zu konventionell gefertigten Produkten oft nur aus wenigen Komponenten bzw. aus einem Stück bestehen und – je nach Verfahren und weiterer technischer Entwicklung – gegebenenfalls aus unterschiedlichen Materialien zusammengesetzt sein können.
- *Substitution natürlicher Rohstoffe durch Kunststoff*: Die additive Fertigung kann dazu beitragen, dass Produkte, die bislang aus natürlichen Rohstoffen

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

wie Holz hergestellt werden, vermehrt aus Kunststoff gefertigt werden (z.B. Möbel), was sich negativ auf die Ökobilanz dieser Produkte auswirkt.

› *Effizienzverluste durch eine dezentrale Produktion*: Durch eine dezentrale Produktion kann zwar gegebenenfalls der Logistikaufwand reduziert werden, bei einer Vielzahl von Klein- und Kleinstfabriken sind allerdings Effizienzverluste beim Energie- und Ressourceneinsatz wahrscheinlich.

Stand der Forschung 2.3

Wie sich die diversen potenziell positiven und negativen ökologischen Effekte in einer Gesamtbilanz über den gesamten Lebenszyklus eines additiv gefertigten Produktes im Vergleich mit einem aus konventioneller Herstellung darstellen, ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch unklar. Quantitative Studien dazu sind noch sehr rar, unterscheiden sich zum Teil deutlich in ihren jeweiligen Fragestellungen, Ausgangsbedingungen sowie methodischen Herangehensweisen und betrachten oft nur eine Teilmenge der ökologischen Effekte, was den direkten Vergleich der erzielten Ergebnisse erheblich erschwert (vgl. auch Petschow et al. 2014, S. 28). Außerdem fokussieren die meisten Studien nur auf den direkten Energiebedarf während des additiven Fertigungsvorgangs, und oft wird dieser nicht den Energie- und Materialerfordernissen konventioneller Fertigungsverfahren vergleichend gegenübergestellt (Huang et al. 2016, S. 1560). Für belastbare Abschätzungen zu möglichen Umweltwirkungen der additiven Fertigung fehlt es somit zurzeit noch an einer fundierten Wissensgrundlage.

Gleichwohl weisen die bisher vorliegenden Studienergebnisse darauf hin, dass die Umweltbilanz der additiven Fertigung nicht per se besser (oder schlechter) ist im Vergleich zu konventionellen Fertigungsmethoden. Vielmehr hängt sie in starkem Maße von den eingesetzten Verfahren, Technologien und Materialien, den damit verknüpften Produktions- und Logistikprozessen sowie im Besonderen vom möglichen ökologischen Zusatznutzen der additiv gefertigten Produkte ab, beispielsweise eine Gewichtsreduktion durch neuartige Strukturen. Dies wird im Folgenden anhand von drei aktuellen Untersuchungen illustriert.

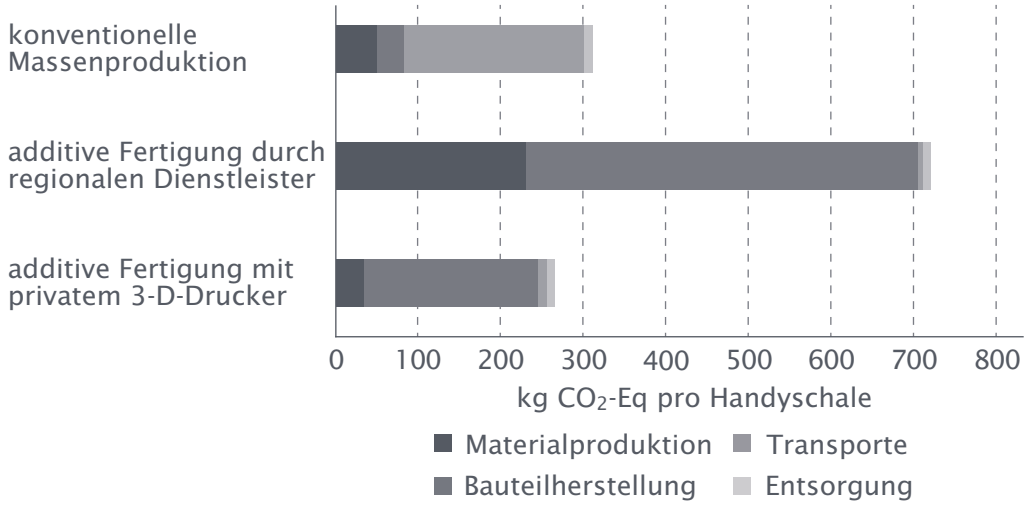
Umwelteffekte durch eine dezentrale Produktion

Petschow et al. (2014, S. 32 ff.) sind der Frage nach möglichen ökologischen Vorteilen einer durch die additive Fertigung beförderten Dezentralisierung der Produktion nachgegangen. Dazu wurden die Treibhausgasemissionen ermittelt, die bei Herstellung, Transport und Nutzung einer Handyschale aus Kunststoff für unterschiedliche konventionelle und additive Produktionsvarianten entstehen. Es wurden u.a. die folgenden drei Produktionsszenarien betrachtet:

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

- *Konventionelle Massenproduktion*: Die Handyschale wird im Spritzgussverfahren in China auf Lager gefertigt und über mehrere logistische Knoten (u.a. per Luftfracht) nach Deutschland transportiert. Die Versorgung mit Rohstoffen erfolgt über einen lokalen Lieferanten.
- *Additive Fertigung durch einen regionalen Dienstleister*: Die Fertigung erfolgt auf einer professionellen additiven Fertigungsanlage im SLS-Verfahren (Kap. III.2) in Kundennähe. Das Ausgangsmaterial (Kunststoffpulver) wird von einer deutschen Firma hergestellt.
- *Herstellung auf einem 3-D-Drucker zu Hause*: Der Kunde fertigt die Handyschale auf dem eigenen 3-D-Drucker im Schmelzschichtverfahren (Kap. III.2). Er verwendet den Kunststoff PLA in Form von Filament. Der Rohstoff wird in den USA produziert und (u.a. per Schiff) nach Deutschland transportiert, wo das Filament hergestellt wird.

Abb. V.1 Treibhausgasemissionen für verschiedene Varianten der Handyschalenproduktion



CO_2-Eq: CO_2-Äquivalente. Zur Vergleichbarkeit der Klimawirkung verschiedener Treibhausgase werden Emissionsmengen in CO_2-Eq angegeben (IPCC 2007, S. 32 ff.)

Quelle: nach Petschow et al. 2014, S. 40

Die für diese drei Produktionsszenarien erwarteten Treibhausgasemissionen sind in Abbildung V.1 dargestellt, aufgeschlüsselt nach den Bereichen Materialproduktion, Bauteilherstellung, Transport und Entsorgung. Demnach liegen die Emissionen der Handyschalenproduktion auf dem privaten 3-D-Drucker nur unwesentlich unter jenen der konventionellen Massenproduktion: Durch die heimische Produktion können gegenüber der konventionellen Massenfertigung

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

zwar die transportbedingten Umweltbelastungen verringert werden, dafür ist aber der Ressourcenverbrauch bei der additiven Bauteilherstellung höher. Die höchsten Treibhausgasemissionen werden für die additive Fertigung bei einem regionalen Dienstleister erwartet, obschon auch hier kaum transportbedingte Emissionen anfallen. Für das betrachtete Szenario liegt dies an der Verwendung der professionellen laserbasierten additiven Fertigungsanlage, die einen höheren Energieeinsatz für die Bauteilherstellung bedingt und pulverförmige Ausgangsmaterialien verarbeitet, deren Herstellung energieintensiv ist.

Zu beachten ist aber, dass die hier ermittelten Treibhausgasemissionen stark von den gewählten Rahmenbedingungen abhängen. Beispielsweise fallen die transportbedingten Emissionen im Szenario der konventionellen Massenproduktion so hoch aus, weil ein Transport der Handyschalen per Flugzeug angenommen wurde. Die vergleichsweise geringe Umweltbelastung bei der Herstellung des Filaments für den 3-D-Drucker liegt daran, dass der Kunststoff PLA betrachtet wurde, der aus nachwachsenden Rohstoffen erzeugt wird und deshalb eine bessere Umweltbilanz aufweist als etwa der erdölbasierte Kunststoff ABS.

Erschließung von Leichtbaupotenzialen

In Bezug auf mögliche positive Umwelteffekte der additiven Fertigung werden regelmäßig die Möglichkeiten zur Herstellung von geometrisch komplexen Leichtbaustrukturen hervorgehoben. Insbesondere in der Luftfahrt sollen damit beträchtliche Einsparungen beim Treibstoffverbrauch erzielbar sein (Kap. II.1.3).

Um das hier erschließbare Potenzial abzuschätzen, haben Huang et al. (2016) in einem ersten Schritt alle diejenigen metallischen Flugzeugkomponenten identifiziert, die sich in den nächsten 5 bis 20 Jahren erwartungsgemäß auch durch eine additive Serienproduktion fertigen lassen (z.B. Metallhalter, Gurtschnallen, Scharniere etc.). Für diese Komponenten wurden auf der Basis von Erfahrungen mit ersten Prototypen die realisierbaren Gewichtseinsparungen im Vergleich zu konventionell gefertigten Komponenten abgeschätzt. Sie bewegten sich in einem Bereich von 35 bis 65 %. Würden alle additiv gefertigten Komponenten anstelle ihrer konventionellen Pendants in ein durchschnittliches Passagierflugzeug eingebaut, könnte sein Leergewicht um 4 bis 7 % reduziert werden.

In einem zweiten Schritt wurden die dadurch zu erwartenden Treibstoffeinsparungen in der US-amerikanischen Passagierluftfahrt für den Zeitraum bis 2050 modelliert, wofür verschiedene Diffusionsgeschwindigkeiten für die additiv gefertigten Komponenten unterstellt wurden. Als hohe Diffusionsgeschwindigkeit wurde angenommen, dass es ab dem Zeitpunkt der Markteinführung einer neuen additiv gefertigten Komponente lediglich 5 Jahre dauern würde, bis 80 % der weltweiten Produktion für dieses Bauteil additiv erfolgt. Unter diesen Voraussetzungen könnte der Treibstoffverbrauch bis zum Jahr 2050 um bis zu

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

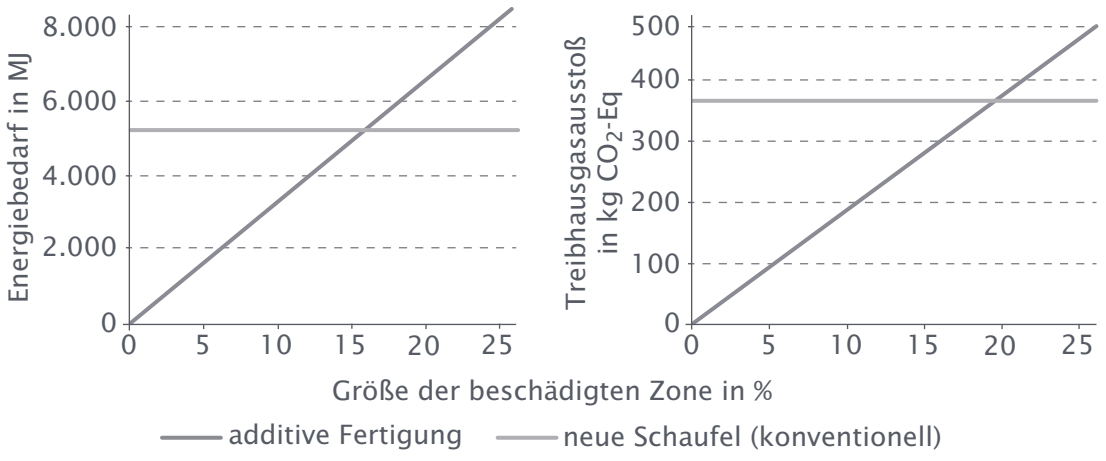
4 Mio. t im Jahr bzw. die damit verbundenen Treibhausgasemissionen um rund 13 Mio. t CO_2-Eq pro Jahr reduziert werden, was einem Einsparpotenzial von rund 6,4 % entspräche. Bei einer (vermutlich realistischeren) mittleren Diffusionsgeschwindigkeit von 15 anstelle von 5 Jahren halbiert sich dieses Einsparpotenzial.

Mithilfe der additiven Fertigung ließe sich demnach ein beachtliches Einsparpotenzial für Treibhausgasemissionen im Luftverkehr realisieren. Gemessen an dem auf der UN-Klimakonferenz in Paris formulierten Ziel, die weltweiten Nettoemissionen in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts auf null zu reduzieren, wäre dieser Einzelbeitrag der additiven Fertigung jedoch von untergeordneter Bedeutung.

Reparatur von Verschleißteilen

Ein an Bedeutung gewinnendes Einsatzfeld der additiven Fertigung liegt in der Reparatur von nur partiell beschädigten hochwertigen Maschinen- oder Anlagenkomponenten (Kap. II.1.2). Um die damit assoziierte positive Umweltwirkung zu quantifizieren, haben Wilson et al. (2014) den konkreten Fall einer partiell beschädigten Turbinenschaufel betrachtet und den Energie- und Ressourcenbedarf einerseits für deren Reparatur mithilfe der additiven Fertigung (Laserauftragschweißen, Kap. III.3.1), andererseits für deren Neubau mittels konventioneller Gusstechnik ermittelt.

Abb. V.2 Additive Reparatur vs. konventioneller Neubau



Quelle: Wilson et al. 2014, S. 177

Der Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen für die beiden Varianten sind in Abbildung V.2 dargestellt. Im Fall der Reparatur mittels additiver Ferti-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

gung hängen diese von der Größe der beschädigten Zone ab: Je größer das beschädigte Volumen, desto höher ist der erforderliche Einsatz an Material und Prozessenergie. Gemessen am Treibhausgasausstoß weist die additive gegenüber der konventionellen Reparatur eine bessere Umweltbilanz auf, solange die beschädigte Zone weniger als 18 % des Gesamtvolumens der Turbinenschaufel umfasst. Bei einem Reparaturvolumen von 10 % können durch die additive anstelle der konventionellen Reparatur 36 % an Energie und 45 % an Treibhausgasemissionen eingespart werden.

Zusammenfassend ist zu konstatieren, dass pauschale Aussagen zur ökologischen Wirkung der additiven Fertigung nicht möglich sind. Bestenfalls können für einzelne Produktkategorien vergleichende Betrachtungen für verschiedene additive und konventionelle Produktionsvarianten angestellt werden. Dabei wird deutlich, dass immer das Gesamtsystem zu betrachten ist, da die Ökobilanzen der unterschiedlichen Produktionsvarianten im hohen Maße abhängig sind von den eingesetzten Verfahren, Technologien und Materialien, den unterstellten Warenströmen sowie von den konkret betrachteten Produkten und ihren jeweiligen Anwendungskontexten. Beispielsweise kann die additive Fertigung durch die Dezentralisierung der Produktion auf der einen Seite zu einer Reduktion der transportbedingten Umweltbelastungen beitragen. Auf der anderen Seite können allerdings energetische Mehrverbräuche bei der Materialherstellung und additiven Fertigung der Bauteile entstehen. Die ökologische Gesamtbilanz muss daher nicht automatisch besser sein als bei konventionellen Produktionsvarianten. Der vermutlich größte ökologische Nutzen der additiven Fertigung liegt in der Möglichkeit, an den jeweiligen Anwendungszweck optimierte Bauteilgeometrien zu realisieren (z.B. gewichtsreduzierte Bauteile für den Transportsektor), oder in Spezialanwendungen, wie z.B. bei Reparaturarbeiten. Der diesbezügliche Forschungsstand ist aber in vielerlei Hinsicht noch unbefriedigend.

Risiken für die Gesellschaft 3.

Gesundheitliche Risiken bei der Verwendung von additiven Fertigungsanlagen bzw. 3-D-Druckern 3.1

Während des additiven Fertigungsprozesses kann es je nach Verfahren und verwendeten Materialien zu Emissionen von Kleinstpartikeln und/oder gasförmigen Substanzen kommen, die sich in geschlossenen Räumen in der Atemluft anreichern und unter Umständen eine Gefahr für die Bediener der Anlagen darstellen können. Weitere Gesundheitsrisiken können von giftigen Materialien (Ausgangsmaterialien oder in der Nachbearbeitung verwendete Chemikalien)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

sowie der Verpuffungs- bzw. Explosionsgefahr von pulverförmigen Ausgangsmaterialien ausgehen.

Findet der Einsatz der additiven Fertigung im industriellen Bereich statt, dürften solche Risiken in der Regel ohne Weiteres durch die Einhaltung der relevanten Vorschriften und Auflagen des Arbeitsschutzes beherrschbar sein (Tragen von Schutzausrüstung etc.). Gleichzeitig entfallen zahlreiche arbeitsbedingte Gefahrenquellen, die in der konventionellen industriellen Fertigung auftreten. Beispielsweise sind keine Kühlschmiermittel vonnöten, die bei den subtraktiven Fertigungsverfahren oft eingesetzt werden und zur Anreicherung von gesundheitsschädigenden Ölen in der Atemluft führen können. Auch sinkt die Gefahr für Schnittverletzungen z.B. an scharfkantigen Spänen oder Schneidwerkzeugen. Schließlich sind die Lärmemissionen bei der additiven Fertigung zu vernachlässigen.

Als problematischer ist die Situation dagegen für Anwendungen im nichtindustriellen Bereich zu bewerten, wo es möglicherweise an den erforderlichen Kenntnissen, Ressourcen und Ausstattungen zur Vermeidung bzw. Minderung von potenziellen Gesundheitsrisiken fehlt. Hierzu zählt der Einsatz von 3-D-Druckern oder semiprofessionellen Anlagen im privaten Bereich, in FabLabs, Schulen oder Universitäten.

Toxische Materialien bei der additiven Fertigung

Die Vielfalt an Ausgangsmaterialien für die additive Fertigung ist groß und fortlaufend kommen neue Materialentwicklungen auf den Markt. Bei den Kunststoffen reicht die Materialpalette von thermoplastischen Kunststoffen (ABS, PLA, Polycarbonate etc.) über Fotopolymere (Epoxid- oder Acrylharze) bis zu pulverförmigen Kunststoffen (Nylon, Polystyrole etc.) und diversen Bindemitteln (Kap. III.2). Während viele dieser Kunststoffe (außer bei einer oralen Aufnahme) in der Regel gesundheitlich unbedenklich sind, zählen einige zu den reizenden Stoffen, die bei Kontakt mit Haut, Augen oder Schleimhäuten Rötungen oder Entzündungen auslösen. Hierzu gehören etwa die bei der Stereolithografie verwendeten Fotopolymere, die darüber hinaus zur Auflösung von roten Blutkörperchen führen können (Gebhardt et al. 2015, S. 52). Insbesondere für neu entwickelte Materialien sind mögliche gesundheitliche Wirkungen häufig noch unbekannt (Huang et al. 2013, S. 1199 f.).[72]

Ähnliches gilt für einige der Lösungsmittel, die zur Nachbearbeitung additiv gefertigter Bauteile verwendet werden, z.B. Aceton, Isopropanol oder Propylen-

72 Beispielsweise wurde vor über 10 Jahren ein neues Epoxidharz am Markt eingeführt, welches im Verdacht steht, Veränderungen im Erbgut und in der Zellstruktur zu verursachen (Huang et al. 2013, S. 1199).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

carbonat zur Entfernung von Stützstrukturen. Bei Augenkontakt können diese schwere Reizungen auslösen (Tragen von Augenschutz empfohlen), sind davon abgesehen aber in der Regel ohne bzw. von nur schwacher toxischer Wirkung (Huang et al. 2013, S. 1200).

Risiken bei pulverbasierten additiven Fertigungsverfahren

Pulverpartikel können bei verschiedenen Arbeitsschritten in die Raum- bzw. Atemluft gelangen, u.a. beim Befüllen der additiven Fertigungsanlagen, bei der Entnahme und Reinigung fertiger Bauteile sowie der Aufbereitung von Pulver mithilfe von Sieben (VDI 2016, S. 31). Für die Beurteilung der gesundheitlichen Wirkung von Pulverstäuben ist neben den gegebenenfalls toxischen Inhaltsstoffen vor allem die Partikelgröße relevant. Pulverpartikel mit Durchmessern unter 10 µm können zu einer Reizung der Nasen- und Rachenschleimhäute führen, unter 2,5 µm werden die Partikel lungengängig und können zu Erkrankungen der Atmungsorgane führen (Gebhardt et al. 2015, S. 52). Zwar liegen die *mittleren* Partikeldurchmesser der heute verwendeten pulverförmigen Ausgangsmaterialen bei 25 µm und darüber (Berger et al. 2013, S. 74), allerdings können hier auch Pulverpartikel mit kleinerer Größe enthalten sein. Zu berücksichtigen ist darüber hinaus die Explosionsgefahr, die von Pulver-Luft-Gemischen aus Kunststoffen oder Metallen ausgehen kann und umso höher ausfällt, je kleiner die Pulverpartikel und je reaktiver die Ausgangsstoffe sind (VDI 2016, S. 31).

Emissionen bei kunststoffbasierten additiven Fertigungsverfahren

Beim Aufschmelzen von Kunststoffen entstehen typischerweise flüchtige organische Verbindungen und/oder ultrafeine Stäube (Partikel kleiner 0,1 µm, die durch die Bronchien bis in die Lungenbläschen dringen), die eingeatmet von potenziell gesundheitsschädigender Wirkung sind. Das Gefährdungspotenzial bestimmt sich aus der Toxizität der emittierten Substanzen, der Konzentration in der Atemluft und der Expositionsdauer. Diese Faktoren hängen wiederum von den eingesetzten Verfahren, Geräten (z.B. offener oder geschlossener Bauraum) und Materialien ab sowie von den Gegebenheiten der Einsatzsituation (z.B. Größe und Belüftung des Raumes, in dem die Anlagen betrieben werden).

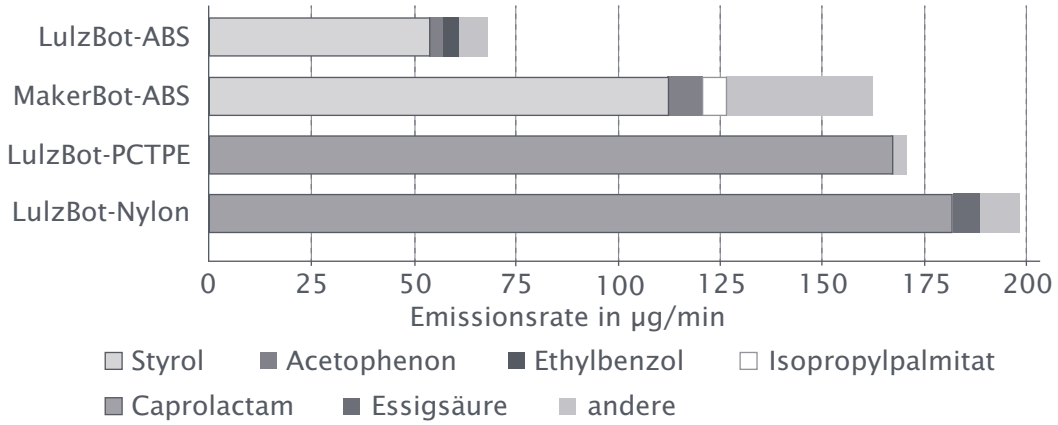
Ob bzw. welche gesundheitlichen Risiken von den Emissionen während des Betriebs von additiven Fertigungsanlagen in Abhängigkeit von den Einsatzbedingungen ausgehen, ist Gegenstand laufender Forschungsvorhaben. Im Fokus stehen bislang vor allem 3-D-Drucker für Privatanwender, die mit dem Schmelzschichtverfahren (Kap. III.2.1) thermoplastische Kunststoffe verarbeiten. Diese Geräte verfügen über einen offenen bzw. mit einer oft nur locker sitzenden Plastikhülle abdeckten Bauraum, während professionelle Anlagen in der

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Regel mit einer gut abgedichteten Baukammer ausgestattet sind (Yi et al. 2016, S. 460). Weitverbreitet sind die beiden Kunststoffe Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) und Polymilchsäure (PLA), andere Thermoplaste wie Polycarbonate oder Nylon gewinnen jedoch zunehmend an Popularität.

Die Emissionen von fünf aktuell erhältlichen, populären 3-D-Druckern bei Verwendung unterschiedlicher gängiger Ausgangsmaterialien wurden in der Untersuchung von Azimi et al. (2016) gemessen.[73] Hinsichtlich der flüchtigen organischen Verbindungen variieren die Gesamtemissionen stark in Abhängigkeit von den verwendeten Materialien und 3-D-Druckern und liegen in einem Bereich von 3 µg pro Minute (für ein Polycarbonat) bis rund 200 µg pro Minute für Nylon. Bezüglich der emittierten stofflichen Komponenten wurden die höchsten Werte für Styrol (bei der Verwendung von ABS auf einigen 3-D-Druckern) und Caprolactam (bei der Verwendung von nylonbasierten Ausgangsmaterialien) gemessen.

Abb. V.3 Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen unterschiedlicher 3-D-Drucker-Material-Kombinationen



Quelle: Azimi et al. 2016, S. 1265

Die Abbildung V.3 zeigt die Messergebnisse für die vier 3-D-Drucker-Material-Kombinationen mit den höchsten Emissionsraten. Styrol und Caprolactam sind laut der EU-Chemikalienverordnung CLP[74] beim Einatmen gesundheitsschäd-

73 Untersucht wurden die 3-D-Drucker MakerBot Replicator 2X, LulzBot Mini, XYZprinting da Vinci 1.0, Dremel 3D Idea Bulider und FlaschForge Creator. Bei den Materialien handelt es sich um ABS, PLA, HIPS (ein Polystyren), Nylon, Laybrick, Laywood (Kap. III.2.1), Polycarbonat sowie ein nylonbasiertes Polyamid (PCTPE).

74 Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

lich und können Haut- und schwere Augenreizungen verursachen. Styrol steht ferner im Verdacht, das Kind im Mutterleib zu schädigen (z.B. GESTIS-Stoffdatenbank 2016).

Tab. V.1 Schadstoffkonzentration in der Atemluft

Raum/ Situation	Volumen/ Lüftung	Konzentration Styrol	Konzentration Caprolactam
FabLab; drei Drucker in Betrieb	150 m³; Luftwechsel 5-mal pro Stunde	44 µg/m³	27 µg/m³
schlecht durchlüftetes Wohnungszimmer; ein Drucker in Betrieb	30 m³; Luftwechsel 0,3-mal pro Stunde	1.220 µg/m³	753 µg/m³
maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK-Werte)		86.000 µg/m³	5.000 µg/m³

Eigene Berechnung; MAK-Werte nach GESTIS-Stoffdatenbank 2016

Für die Gefährdungsbeurteilung ist die Schadstoffkonzentration in der Atemluft heranzuziehen, die zusätzlich zur Emissionsrate u.a. vom Raumvolumen, von der Raumlüftung und der Betriebsdauer des 3-D-Druckers abhängt. In Tabelle V.1 sind die erwarteten Atemluftkonzentrationen für Styrol und Caprolactam für zwei exemplarische Fallsituationen dargestellt: zum einen für die Situation in einem FabLab, in dem gleichzeitig mehrere 3-D-Drucker im Einsatz sind (mit einem für solche Räume typischen Luftwechsel), zum anderen für den Betrieb eines 3-D-Druckers in einem schlecht belüfteten Wohnungszimmer (mit geschlossenen Fenstern und Türen), z.B. einem Kinderzimmer. Im Sinne einer Worst-Case-Schätzung wurden für die Berechnung jeweils die höchsten gemessenen Emissionsraten angesetzt sowie von einem Dauerbetrieb der Drucker ausgegangen.[75] Im Ergebnis sind die erreichten Schadstoffkonzentrationen in keinem der betrachteten Fälle als gesundheitsschädigend zu beurteilen, zumindest wenn zum Vergleich die empfohlenen maximalen Arbeitsplatzkonzentrationen (MAK-Werte)[76] für die beiden Substanzen herangezogen werden. Diese liegen für den Fall des schlecht durchlüfteten Wohnungszimmers um den Faktor 70 (für Styrol) bzw. den Faktor 6,6 (für Caprolactam) über der errechneten

75 Für die flüchtigen organischen Verbindungen wurden Sorptionsverluste vernachlässigt. Für die ultrafeinen Partikel wurde eine Depositionsrate von 1,3 pro Stunde angenommen (vgl. auch Azimi et al. 2016, S. 1266).

76 Der MAK-Wert gibt an, bis zu welcher Konzentration eines Stoffes im Allgemeinen keine schädlichen Auswirkungen auf die Gesundheit zu erwarten sind, auch wenn jemand täglich 8 Stunden an 5 Tagen pro Woche dem Stoff ausgesetzt ist.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Schadstoffkonzentration. In unmittelbarer Nähe zum 3-D-Drucker könnten allerdings höhere Konzentrationen auftreten, zudem gelten die MAK-Werte nur für gesunde Personen im erwerbstätigen Alter.

Auch was die Emissionen an ultrafeinen Stäuben angeht, variieren die gemessenen Werte stark je nach 3-D-Drucker, Materialien und Drucktemperaturen. Für ABS-Ausgangsmaterialien wurden generell höhere Emissionsraten gemessen (20 bis 90 Mrd. Partikel pro Minute) als für PLA (100 Mio. Partikel pro Minute), während die Werte für die anderen Materialien dazwischenlagen (Azimi et al. 2016, S. 1264). Damit liegen die Emissionsraten für ABS in derselben Größenordnung wie beim Einsatz von 2-D-Laserdruckern mit hohen Emissionswerten (ca. 90 Mrd. Partikel pro Minute; Hänninen et al. 2010, S. 96), für PLA um den Faktor 1.000 darunter. Dies legt auf den ersten Blick eine vergleichbare Gefährdungsbeurteilung wie für 2-D-Laserdrucker nahe.[77] Zu bedenken ist allerdings, dass ein typischer Druckvorgang beim 3-D-Drucker länger dauert als beim 2-D-Druck. Auch bestehen die ultrafeinen Stäube jeweils aus unterschiedlichen stofflichen Komponenten, sodass weitere Forschung zur Gefährdungsbeurteilung der Staubemissionen von 3-D-Druckern angebracht erscheint.

Risiken der additiven Fertigung für die innere und äußere Sicherheit 3.2

Regelmäßig werden Befürchtungen geäußert, dass additive Fertigungsverfahren dazu missbraucht werden könnten, um unerlaubt Gegenstände zu fertigen, die der staatlichen Kontrolle unterliegen. In diesem Zusammenhang problematisiert wird insbesondere die Herstellung von Kleinwaffen (Schusswaffen, Schlagringe etc.) durch Privatpersonen oder andere nichtstaatliche Akteure mit kriminellen oder gar terroristischen Absichten. Zwar werden Privatpersonen nicht erst durch additive Fertigungsverfahren befähigt, illegal Waffen oder andere sicherheitsrelevante Gegenstände (wie etwa Kopien mechanischer Schlüssel) herzustellen – dies ist in der Regel mit konventionellen Verfahren genauso möglich –, doch wird deren Herstellung möglicherweise wesentlich erleichtert.

Additive Fertigungsverfahren werden aber auch von Staaten in zunehmendem Maße für die Herstellung von Rüstungsgütern eingesetzt (Kap. II.1.13). Dies entwickelt sich unter Umständen dann zu einem sicherheitspolitischen

77 Aus den Emissionen von 2-D-Laserdrucker resultieren nach Einschätzung der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin keine relevanten Risiken, da der Staubgrenzwert um den Faktor 100 unterschritten wird. Je nach stofflicher Zusammensetzung der Stäube können im Einzelfall andere Wirkungen (z.B. allergische Reaktionen) nicht ausgeschlossen werden. Empfohlen wird ein Druckbetrieb nur in hinreichend großen und gut belüfteten Räumen (BAUA 2015).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Problem, wenn dies in Ländern geschieht, die durch die bestehenden Instrumente der Rüstungskontrolle am Ausbau ihrer militärischen Kapazitäten gehindert werden sollen.

Herstellung von Kleinwaffen mit dem privaten 3-D-Drucker

Ihren Ursprung haben solche Befürchtungen u.a. in den Aktivitäten des US-Amerikaners Cody Wilson und der 2012 von ihm mitbegründeten Organisation Defense Distributed.[78] Im Mai 2013 verkündete die Organisation, erstmalig eine funktionsfähige Pistole aus Kunststoff additiv gefertigt zu haben, und stellte die digitalen Vorlagen für den Nachbau der Waffe für jeden frei verfügbar ins Internet. Die aus 15 Kunststoffteilen bestehende Pistole namens Liberator kann mit allen gängigen 3-D-Druckern für Privatanwender hergestellt werden, lediglich als Schlagbolzen zur Zündung der Munition ist ein einfacher Nagel aus Metall notwendig (Abb. V.4). Die Gruppe motiviert ihre Aktivitäten mit libertären bzw. anarchistischen Idealen sowie der Verteidigung der US-amerikanischen Bürgerrechte in Bezug auf den privaten Waffenbesitz (VDI/VDE-IT 2015, S. 33).

Die digitalen Vorlagen für die Liberator wurden angeblich innerhalb von nur wenigen Tagen über 100.000-mal heruntergeladen, bevor das US-amerikanische Außenministerium unter Strafandrohung die Löschung der Baupläne durchsetzte. Begründet wurde die Regierungsintervention mit einer Verletzung der Regeln über den internationalen Handel mit Waffen (International Traffic in Arms Regulation [ITAR]). Weil sich Wilson dadurch in seinen Rechten verletzt fühlt (Recht auf Waffenbesitz, Recht auf freie Meinungsäußerung), befindet er sich seit 2015 in einem Rechtsstreit mit der US-Bundesregierung. Seine Klagen wurden bisher allerdings abgewiesen (Condemarin 2015d). Auch wenn Wilson die digitalen Vorlagen für die Liberator auf seiner Webseite gelöscht hat, kursieren die digitalen Vorlagen für die Liberator weiterhin auf zahlreichen Onlinetauschbörsen (VDI/VDE-IT 2015, S. 33).

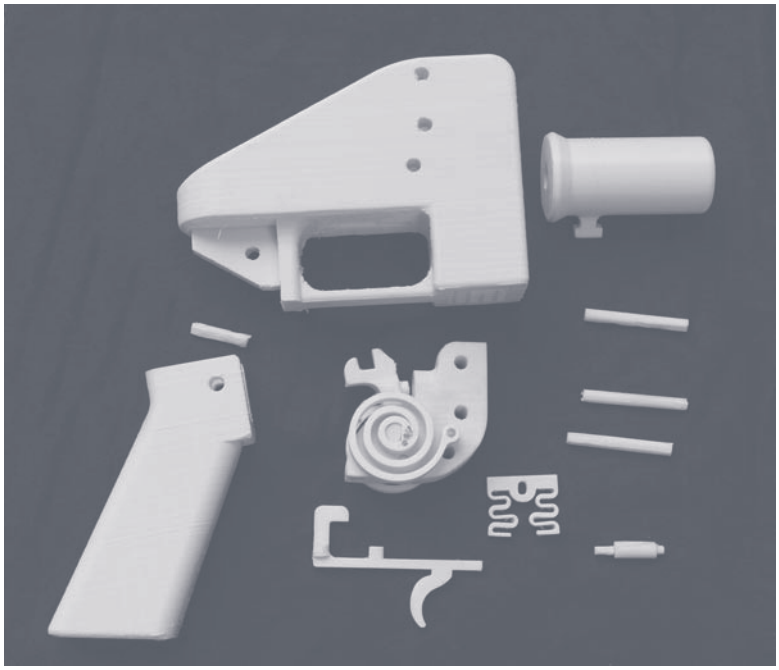
Eine 2013 von Wilson in Internetvideos[79] präsentierte, allerdings auf einer 8.000 US-Dollar teuren semiprofessionellen additiven Fertigungsanlage hergestellte Liberator erlaubte augenscheinlich das Abfeuern zumindest eines Schusses (Hottelet 2013). Dagegen erweist sich die Waffe, wenn sie mit einem handelsüblichen 3-D-Drucker für Privatanwender und den hier verwendeten Ausgangsmaterialen gefertigt wird, als nicht funktionstüchtig: Wie verschiedene Versuche gezeigt haben, versagt entweder die Mechanik oder der hohe Explosionsdruck

78 https://defdist.org (23.12.2016)
79 www.youtube.com/watch?v=qbKJYmTJkEU (23.12.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

beim Abschuss lässt den Kunststofflauf zerbersten, wodurch das Projektil kaum einen halben Meter weit fliegt (z.B. Chip.de 2014; Wilkens 2013).[80]

Abb. V.4 Additiv gefertigte Teile für die Schusswaffe Liberator



Quelle: © CHIP/Martin Jäger

Daraus eine Relativierung der potenziellen Gefahr von Schusswaffen aus 3-D-Druckern abzuleiten, wäre allerdings verfrüht, denn zum einen werden die Geräte und Ausgangsmaterialien für Privatanwender immer leistungsfähiger. Beispielsweise werden bereits 3-D-Drucker angeboten, die Carbon- oder glasfaserverstärkte Kunststoffe verarbeiten können und sich dadurch unter Umständen besser für die Herstellung von Kunststoffwaffen eignen könnten (Honsel 2015). Auch ist nicht auszuschließen, dass künftig 3-D-Drucker für die Verarbeitung von Metallen auf den Markt gelangen. Zum anderen finden sich im Internet mittlerweile diverse weitere Ideen und digitale Vorlagen für die Waffenherstellung mit einem 3-D-Drucker. So wurde 2014 eine neu entwickelte Patrone vorgestellt, die, mit einer verstärkten Hülse ausgestattet, den Explosionsdruck auf den Waffenlauf deutlich verringern soll (VDI/VDE-IT 2015, S. 33). Auch werden bereits digitale Vorlagen für Hybridwaffen angeboten, die größtenteils aus Kunststoff gefertigt sind, während der Lauf und gegebenenfalls weitere kleinere

80 Zu einem gegenteiligen Ergebnis scheinen allerdings ähnliche Versuche in Österreich gelangt zu sein, wie aus einem Bericht des österreichischen Bundesministeriums für Inneres hervorgehen soll (Bundesregierung 2013a, S. 3).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Bauteile aus Metall bestehen, die z.B. in den USA legal und ohne Registrierung erworben werden können. Solcherart konstruierte Waffen sollen – wenn man sie nach mehrfachen Schussabgaben wieder abkühlen lässt, damit der Kunststoff nicht zu schmelzen beginnt – auch voll funktionsfähig sein (Grunewald 2016).

Entsprechend wird das Thema von Sicherheitsbehörden in Deutschland wie auch weltweit sehr ernst genommen. Denn zum einen werden Privatpersonen und andere nichtstaatliche Akteure potenziell in die Lage versetzt, unter Umgehung der staatlichen Kontroll- und Überprüfungsmöglichkeiten nichtregistrierte Schusswaffen(teile) herzustellen und zu verbreiten (in Deutschland bedarf der Umgang mit Waffen grundsätzlich einer an Bedingungen geknüpften Erlaubnis; ausführlich Kap. VI.4). Zum anderen dürften größtenteils aus Kunststoff gefertigte Waffen weitaus einfacher unentdeckt durch die Sicherheitskontrollen an Flughäfen, in öffentlichen Gebäuden etc. zu schleusen sein als konventionelle Schusswaffen: Unter der Kleidung verborgene Kunststoffteile bleiben bei Personenkontrollen mit Metalldetektoren unerkannt (allerdings sind sie mit Ganzkörperscannern zu erkennen), und (gegebenenfalls) erforderliche kleinere Metallteile wie Patronen, Schlagbolzen oder Metallrohre sind mittels Gepäckröntgengeräten weitaus schwerer zu erkennen als ganze Schusswaffen. So soll es Berichten zufolge israelischen Journalisten bereits gelungen sein, die Liberator mehrmals unbemerkt durch die Sicherheitskontrollen der Knesset zu schmuggeln (Captain 2013).

In Deutschland befassen sich, wie aus einer Antwort der Bundesregierung (2013a) auf eine kleine Anfrage der Fraktion DIE LINKE hervorgeht, das Bundeskriminalamt (BKA) und die Bundespolizei (BPOL) »mit hoher Priorität« mit der Untersuchung und Bewertung möglicher Gefährdungen durch additiv gefertigte Waffen(teile). Hierzu seien Studien und Erfahrungen von Behörden aus anderen Ländern ausgewertet, eigene Tests mit 3-D-Druckern durchgeführt sowie ein internationaler Informations- und Erfahrungsaustausch initiiert worden. Auch der Bundesnachrichtendienst (BND) sowie einzelne Bundesländer sollen sich mit dem Thema bereits beschäftigen. Weiter antwortete die Bundesregierung (2013a), dass ersten Einschätzungen zufolge die Luftsicherheit durch Waffen aus dem 3-D-Drucker durchaus betroffen sein könne, weshalb umgehend auch die Luftsicherheitsbehörden des Bundes und der Länder informiert worden seien, um die Unterrichtung des Kontrollpersonals sicherzustellen.

Auch international hat das Thema seit 2013 diverse politische Aktivitäten ausgelöst (dazu VDI/VDE-IT 2015, S. 34): Großbritannien erweiterte Ende 2013 seine Leitlinien zur Waffengesetzgebung um Formulierungen, die klarstellen, dass Herstellung, Kauf, Verkauf und Besitz von Schusswaffen(teilen) aus dem 3-D-Drucker ohne erforderliche Lizenz illegal sind und mit bis zu 10 Jahren Haft bestraft werden können. Ähnliche Gesetzesanpassungen wurden 2015 im australischen Bundestaat New South Wales vorgenommen: Hier steht bereits der

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Besitz von digitalen Vorlagen zur additiven Fertigung von Schusswaffen unter Strafe (Butler Millsaps 2015). In den USA haben einzelne Städte die additive Fertigung von Waffen verboten (z.B. Philadelphia; Thum 2013). In Kalifornien treten ab 2018 neue Gesetze in Kraft, die eine staatliche Registrierung von Schusswaffen aus dem 3-D-Drucker erforderlich machen (dies setzt auch eine Zuverlässigkeitsprüfung des Waffenbesitzers voraus), außerdem muss in Kunststoffwaffen ein Stück Edelstahl eingebettet werden, um sie für Metalldetektoren empfindlich zu machen (Krämer 2016b). Berichten zufolge sollen in der US-amerikanischen Bundesregierung Bemühungen laufen, die Regeln über den internationalen Handel mit Waffen zu verschärfen, wodurch die Verbreitung von digitalen Vorlagen für die additive Fertigung von Waffen(teilen) im Internet künftig unter Strafe stehen würde (Krassenstein 2015b). Die Schweiz reagierte bereits 2013 mit einer Verschärfung der Sicherheitsbestimmungen an Flughäfen, zudem wurde das Sicherheitspersonal an Gepäckröntgengeräten mithilfe spezieller Lernprogramme geschult, Einzelteile der Liberator zu erkennen. In Japan, wo eines der strengsten Waffengesetze weltweit existiert, wurde Anfang 2014 ein Mann verhaftet, weil er eine selber additiv gefertigte Schusswaffe in einem Internetvideo vorführte.

Weitere sicherheitsrelevante Gegenstände aus additiver Fertigung

Neben Kleinwaffen lassen sich unterschiedlichste weitere Gegenstände mit einem 3-D-Drucker herstellen, die – mit kriminellen Absichten verwendet – eine potenzielle Bedrohung für die Allgemeinheit darstellen können. Zum Beispiel kursieren im Internet seit 2015 digitale Vorlagen für die additive Fertigung verschiedener Generalschlüssel, mit welchen sich die Schlösser zahlreicher Reisekoffer öffnen lassen sollen (solche Generalschlüssel werden von den Sicherheitsbehörden im Luftreiseverkehr verwendet). Die digitalen Fertigungsvorlagen wurden angeblich auf der Basis von Fotos entsprechender Schlüssel erstellt (Jurran 2016). Bereits 2013 entwickelten zwei Studenten eine Software, die auf Grundlage von Fotos der Schlüssel eines in den USA gängigen Hochsicherheitsschlüsselsystems dreidimensionale Modelle der Schlüssel erstellt (die Software wurde nicht veröffentlicht; Schmieder 2013). Damit scheint die technische Machbarkeit von Schlüsselimitaten mithilfe von 3-D-Druckern unter Beweis gestellt. Wenn weitere ähnliche Vorlagen bzw. Software auch für herkömmliche Haus-, Auto-, Aufzugsschlüssel etc. im Internet Verbreitung finden, hätte dies wohl gravierende Auswirkungen auf die Einbruchskriminalität.

Dazu vergleichbar ist die Idee, auf Basis von (zweidimensionalen) Fingerabdrücken Imitate der Fingerkuppe additiv zu fertigen, um beispielsweise die Sicherheitsfunktion moderner Mobiltelefone auszuhebeln (Krämer 2016c).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Auch Geldautomatenbetrüger machten sich die Möglichkeiten von 3-D-Druckern bereits zunutze, um täuschend echt aussehende Tastaturfelder oder Magnetkartenleser nachzubauen. Diese werden an Geldautomaten montiert, um die Kundendaten zu kopieren (sogenanntes Skimming, Johannes 2011).

Es ist davon auszugehen, dass sich eine Vielzahl weiterer Gegenstände mithilfe von 3-D-Druckern durch Privatpersonen fertigen lässt, die für kriminelle Zwecke einsetzbar sind.

Sicherheitspolitische Implikationen militärischer Anwendungen

Streitkräfte zahlreicher Länder haben das Potenzial der additiven Fertigung für sich erkannt (Kap. II.1.13). Gleichzeitig warnt z.B. das britische Verteidigungsministerium davor, dass die additive Fertigung es anderen Akteuren erleichtere, den rüstungstechnologischen Vorsprung des Vereinigten Königreichs aufzuholen: So sei davon auszugehen, dass additive Fertigungsverfahren zu einer Zunahme des unerlaubten und ungeregelten Technologietransfers führen. Darüber hinaus könnten sie dazu benutzt werden, die Rüstungsprogramme anderer, militärisch bisher weniger entwickelter Staaten zu begünstigen bzw. zu beschleunigen (UK Ministry of Defence 2015, S. 14; vgl. auch Fey 2016, S. 2).

Diese Befürchtungen sind nicht unberechtigt: Aufgrund der hochgradig virtuellen additiven Prozesskette sind gesetzliche Exportkontrollvorschriften einfacher zu umgehen (digitale Vorlagen lassen sich leichter illegal über Landesgrenzen bringen als materielle Güter), zugleich erhöht sich das Risiko für Technologiespionage bzw. -diebstahl. Auch erleichtern additive Fertigungsverfahren etwa in Verbindung mit 3-D-Scannern den Nachbau existierender Waffen(komponenten). Und schließlich kommen alle Vorteile der additiven Fertigung für die industrielle Produktion natürlich auch im militärischen Kontext zum Tragen (schnellere Entwicklungszeiten durch Prototypen- und Werkzeugfertigung, hohe Gestaltungsfreiheit, geringer apparativer Aufwand, Reduzierung der erforderlichen fertigungstechnischen Expertise etc.). Es ist damit denkbar, dass additive Fertigungsverfahren Länder, die dazu bisher technisch oder aufgrund von internationalen Sanktionen und Waffenembargos nicht in der Lage waren, befähigen, komplexe Komponenten moderner Waffensysteme (Drohnen, Triebwerke für Lenkraketen etc.) und andere Rüstungsgüter selbstständig herzustellen. Dies könnte ebenso auf nichtstaatliche Akteure wie Terrorgruppierungen, Aufständische, bewaffnete Milizen etc. zutreffen.

Was die Proliferation von Kernwaffen angeht, reiche laut Fey (2016, S. 23) die heute verfügbare Technologie der additiven Fertigung (noch) nicht aus, um kritische Bestandteile für Kernwaffen bzw. Urananreicherungsanlagen herzustellen (z.B. elektronische Steuerungselemente, Bauteile für Urangaszentrifugen). Dies könnte sich in Zukunft aber gegebenenfalls ändern. In diesem Fall zu prob-

lematisieren sei insbesondere der Umstand, dass geheime Kernwaffenprogramme nachrichtendienstlich noch schwerer aufzudecken wären, da einer additiven Fertigungsanlage im Gegensatz zu speziellen konventionellen Werkzeugen und Anlagen kaum anzusehen ist, was damit tatsächlich hergestellt wird. Zudem könnten, weil das Entdeckungsrisiko vermeintlich kleiner ist, proliferationswillige Unternehmen oder Staaten geneigter sein, Nuklearwaffentechnologie entgegen den internationalen Normen zu exportieren (Fey 2016, S. 23 f.).

Handlungsansätze zur Eindämmung der Risiken

Obschon heute präsentierte Schusswaffen aus dem 3-D-Drucker noch primitiver Bauart sind, (wenn überhaupt) nur eingeschränkt funktionieren und bisher keine Fälle bekannt wurden, bei denen solche Waffen mit kriminellen oder gar terroristischen Absichten Verwendung fanden, sollten angesichts des schnellen technischen Fortschritts in diesem Feld daraus gegebenenfalls resultierende Risiken für die innere Sicherheit nicht unterschätzt werden. Solche Waffen lassen sich nicht nur vergleichsweise einfach und im Verborgenen auch von Personen ohne spezifische Waffenkenntnisse herstellen, auch bestehen sie weitestgehend aus Kunststoff und sind somit mit Metalldetektoren nur schwer zu erkennen. Existierende Sicherheitssysteme (z. B. an Flughäfen) und staatliche Schutz- und Kontrollmechanismen (z. B. Waffenregistrierung) können damit vergleichsweise einfach ausgehebelt werden. Auch ist derzeit noch nicht abzusehen, welche weiteren sicherheitsrelevanten Objekte neben mechanischen Schlüsseln oder künstlichen Fingerabdrücken mit 3-D-Druckern hergestellt werden können. Schließlich lassen sich die Besonderheiten der additiven Fertigung ebenso im militärischen Kontext nutzbringend einsetzen, wodurch sie der weltweiten Verbreitung von Rüstungsgütern Vorschub leisten und damit auch sicherheitspolitische Implikationen haben können.

Zu diskutieren ist daher, wie auf potenzielle Risiken der additiven Fertigung für die innere und äußere Sicherheit reagiert werden könnte. Fey (2016, S. 27 ff.) führt in seiner Analyse drei grundlegende Handlungsansätze zur Verringerung der Risiken auf:

1. Einschränkung der Verfügbarkeit digitaler Vorlagen;
2. technische Schutzmechanismen in der Soft- und Hardware;
3. Anpassung der Exportkontrollregime.

Maßnahmen zur Einschränkung einer ungewollten Verbreitung digitaler Vorlagen für die Herstellung von Waffen(komponenten) können bei den hier relevanten Normen ansetzen. In Bezug auf Waffen aus dem privaten 3-D-Drucker beispielsweise ist in Deutschland die Erstellung und Verbreitung entsprechender digitaler Vorlagen waffenrechtlich nicht strafbar (Bundesregierung 2013b,

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

S. 12; dazu Kap. VI.4). Was die unkontrollierte Verbreitung von digitalen Vorlagen zur Herstellung von militärischen Gütern angeht, enthalten nationale Ausfuhrregulierungen und internationale Exportkontrollregime in der Regel Vorschriften, die auch den immateriellen Technologietransfer regeln (Fey 2016, S. 27). In Deutschland etwa erfasst die nationale Ausfuhrliste auch »Software«,[81] ebenso regelt die EG Dual-Use-Verordnung die nicht gegenständliche »Übertragung von Software … mittels elektronischer Medien« in Nicht-EU-Staaten[82]. Damit ist laut VDI (2016, S. 39 f.) anzunehmen, dass auch digitale Vorlagen für die additiven Fertigung der Exportkontrolle unterliegen; dennoch könnte eine begriffliche Spezifizierung hier für rechtliche Klarheit sorgen. Darüber hinaus sind wegen des erhöhten Risikos für Technologiespionage bzw. -diebstahl die Maßnahmen im Bereich der Cybersicherheit zu überprüfen und gegebenenfalls zu verstärken (Fey 2016, S. 27).

Als technische Schutzmechanismen werden verschiedene Vorschläge diskutiert (dazu Fey 2016, S. 27 f.). Der Konstruktionssoftware oder den additiven Fertigungsanlagen bzw. 3-D-Druckern könnte eine spezielle Filtersoftware implementiert werden, welche zumindest bestimmte sicherheitskritische Gegenstände erkennt und deren Herstellung verunmöglicht. Um eine unkontrollierte Verbreitung digitaler Vorlagen für militärische Güter zu vermeiden, könnten die Dateien mit Kennwörtern, Kopierschutzmechanismen oder Algorithmen, die sie bei unerlaubter Nutzung unbrauchbar machen, ausgestattet werden. Um der Gefahr durch additiv gefertigte Waffen aus Kunststoff zu begegnen, könnten den hierfür geeigneten Ausgangsmaterialien spezielle Kontrastmittel beigefügt werden, um sie für Detektoren besser sichtbar zu machen. Technische Lösungen verlangen aber eine enge Zusammenarbeit zwischen den Behörden und der Industrie in sämtlichen Staaten, in denen Hersteller von Anlagen, Materialien und Software für die additive Fertigung beheimatet sind. Eine solche dürfte allerdings nur schwer zu etablieren sein, da die OECD-Staaten kein Technologiemonopol haben und auch Staaten wie China überzeugt werden müssten. Fraglich bleibt schließlich auch die Effizienz solcher Lösungen: Wie das Beispiel der Musikindustrie zeigt, lassen sich technische Schutzmechanismen für digitale Inhalte mit mehr oder weniger großem Aufwand immer umgehen.

Vorschläge zur Anpassung der Exportkontrollregime und der dazugehörigen Ausfuhrlisten zielen darauf ab, diese um besonders leistungsstarke additive Fertigungsanlagen und dazugehörige Ausgangsmaterialien zu erweitern. Um der Waffenproliferation durch additive Fertigungsverfahren effektiv entgegen-

81 Punkt 0021 in der Anlage 1 zur Außenwirtschaftsverordnung

82 Artikel 2 Nr. 2 lit. iii der Verordnung (EG) Nr. 428/2009 des Rates vom 5. Mai 2009 über eine Gemeinschaftsregelung für die Kontrolle der Ausfuhr, der Verbringung, der Vermittlung und der Durchfuhr von Gütern mit doppeltem Verwendungszweck (Neufassung)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

wirken zu können, bedarf es allerdings eines internationalen Konsenses, zumindest der Technologieführer in diesem Bereich. Auch diesbezüglich dürfte eine internationale Übereinkunft angesichts der Vielzahl der hier relevanten Staaten nur schwer zu erzielen sein (Fey 2016, S. 26 ff.).

Fehlerhafte Produkte aus additiver Fertigung 3.3

Infolge der additiven Fertigung könnten künftig häufiger fehlerhafte Produkte in den Umlauf geraten, durch welche Personen oder Sachen zu Schaden kommen. Dies kann vorsätzlich oder unbeabsichtigt geschehen.

Zu ersterer Kategorie gehört die Manipulation von digitalen Vorlagen für die additive Fertigung: Wenn zwischen Produzenten und Zulieferern bzw. zwischen Produzenten und Konsumenten Produktvorlagen immer häufiger über das Internet ausgetauscht werden, entstehen Möglichkeiten zur Manipulation der digitalen Vorlagen durch Dritte, die zu fehlerhaften oder gar gefährlichen Produkten führen (VDI/VDE-IT 2015, S. 38). Auch wenn dies zurzeit wenig wahrscheinlich erscheint, wären mögliche Gründe dafür die Schwächung von Wettbewerbern, (politische) Wirtschaftssabotage oder gar terroristisch motivierte Handlungen (z. B. Yampolskiy et al. 2016).

Um eine unbeabsichtigte Verbreitung fehlerhafter Produkte zu vermeiden, müssen alle neuen Produkte, die im Rahmen einer Geschäftstätigkeit in den Verkehr gebracht werden, den vom Gesetzgeber festgelegten Anforderungen an die Produktsicherheit entsprechen. Dies gilt genauso für additiv gefertigte Produkte. Einige Besonderheiten der additiven Fertigung können allerdings dazu führen, dass die Einhaltung der gesetzlich geregelten Pflichten unter Umständen schwierig ist. Darauf geht Kapitel VI.2 ausführlich ein.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Rechtliche Rahmenbedingungen und Herausforderungen VI.

Der additiven Fertigung wird das Potenzial zugesprochen, in vielen Bereichen die Produktentwicklung und -fertigung, darauf basierende Geschäftsmodelle sowie das Verhältnis zwischen Konsumenten und Produzenten teilweise massiv zu verändern (Kap. V.1). Damit einhergehend werden vielfältige neue Rechtsfragen aufgeworfen, etwa wenn Urheber- und Verwertungsrechte berührt werden oder haftungsrechtliche Streitfälle bei fehlerhaften Produkten zu klären sind. Für den Gesetzgeber stellt sich die zentrale Frage, ob sich hier abzeichnende rechtliche Problemstellungen durch Anwendung und Auslegung bestehender Normen sachgerecht lösen lassen oder ob weitergehender gesetzgeberischer Handlungsbedarf besteht. Dieser Frage widmen sich die nachfolgenden Ausführungen, die sich angesichts der Komplexität der hier relevanten rechtlichen Materie allerdings auf eine kursorische Darstellung zu beschränken haben, die weder einen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt noch abschließende Bewertungen von offenen Rechtsfragen bieten kann.

Die Ausführungen orientieren sich zum einen an der (bisher nur spärlich vorhandenen) rechtswissenschaftlichen Literatur zum Thema, u.a. an den einschlägigen Publikationen des VDI (2014 u. 2016) sowie an der Monografie von Leupold und Glossner (2016). Zum anderen fußt das Kapitel in wesentlichen Teilen auf den im Rahmen des projektinternen Expertenworkshops (Kap. I) gemachten Einschätzungen von Prof. Dr. Dr. Ensthaler (Lehrstuhl für Wirtschafts-, Unternehmens- und Technikrecht an der TU Berlin) sowie der durch ihn und seinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern erfolgten Kommentierung von Kapitelentwürfen.

Schutz des geistigen Eigentums 1.

Der Produktionsprozess mit additiven Fertigungsverfahren ist hochgradig virtuell: Bis auf den eigentlichen physischen Bauprozess in einer additiven Fertigungsanlage (und gegebenenfalls notwendige Nachbearbeitungsschritte) sind die Arbeitsschritte in der Produktionskette vollständig digital. Im Besonderen sind alle wesentlichen Konstruktions- und Fabrikationsmerkmale des zu fertigenden Produkts in einer digitalen Fertigungsvorlage gespeichert.

Ein effektiver rechtlicher Schutz für die digitalen Vorlagen vor unerlaubter Nutzung durch Dritte ist für alle Akteure unabdingbar, deren Geschäftsmodell auf der additiven Fertigung beruht bzw. die dies für die Zukunft planen. Geraten nämlich diese Daten in die Hände von Wettbewerbern oder tauchen sogar

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

im Internet auf, ist es für Produktnachahmer, die über entsprechende additive Fertigungsanlagen verfügen, ohne großen Aufwand und Fachwissen möglich, vom Original nicht zu unterscheidende Produktimitationen in beliebiger Zahl herzustellen. Im Gegensatz dazu setzen die meist sehr aufwendigen und wissensintensiven konventionellen Herstellungsmethoden der Produktpiraterie auch bei Vorliegen der (digitalen) Konstruktionsdaten häufig Grenzen und nur in seltenen Fällen stellen Imitationen konventioneller Machart zum Original gleichwertige Produkte dar (Leupold/Glossner 2016, S. 57 u. 84 f.).

Das Problem der Produktpiraterie besteht aber nicht nur im Hinblick auf eine unautorisierte Nutzung digitaler Vorlagen für Erzeugnisse, die für die additive Fertigung konzipiert wurden. Grundsätzlich erleichtern additive Fertigungsverfahren den Nachbau von materiellen, auch konventionell gefertigten Produkten. Dazu ist lediglich ein digitales 3-D-Modell des Originalprodukts entweder mit einer CAD-Software oder mit einem 3-D-Scanner[83] herzustellen, was mittlerweile aufgrund frei verfügbarer Softwarelösungen und zunehmend preiswerter 3-D-Scanner immer einfacher umzusetzen ist (Kap. II.2). Verschärfen dürfte sich diese Situation durch die steigende Verfügbarkeit an zunehmend leistungsfähigen, für Privatanwender erschwinglichen 3-D-Druckern (Leupold/Glossner 2016, S. 58). Zwar können mit den aktuell am Markt erhältlichen Geräten nur sehr einfache Kunststoffbauteile gefertigt werden (Kap. II.2), bei fortschreitender Technologieentwicklung ist jedoch nicht auszuschließen, dass Privatpersonen künftig auch komplexere Erzeugnisse aus Kunststoffen oder Metallen selber herstellen können – und ebenso Produktnachahmungen, bei denen (bewusst oder unbewusst) Urheberrechte oder gewerbliche Schutzrechte (u.a. Patent- und Markenrechte) Dritter verletzt werden.

Dass die zunehmende Verbreitung der additiven Fertigung im industriellen und privaten Bereich der Produktpiraterie Vorschub leistet, ist eine vielfach geäußerte Sorge und entsprechend wird der hierdurch drohende wirtschaftliche Schaden als hoch eingeschätzt (laut Prognosen von Marktforschungsinstituten könnte sich dieser im Jahr 2018 auf weltweit über 100 Mrd. US-Dollar belaufen; Gartner 2014). Es ist daher zu klären, ob die bestehenden Normen und Gesetze auch mit Blick auf die Möglichkeiten und Besonderheiten der additiven Fertigung ausreichend sind, um die immateriellen Schutzrechte der Rechteinhaber effektiv zu schützen. Konkret stellen sich drei zentrale Fragen:

83 Während mit Licht arbeitende 3-D-Scanner nur die äußere dreidimensionale Gestalt eines Objekts erfassen können, ermöglichen aufwendigere Verfahren (Ultraschall, Computertomografie etc.) zumindest teilweise auch die Rekonstruktion der inneren Gestalt von Körpern (Berger et al. 2013, S. 154 ff.).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

- Bieten die bestehenden Regelungen für Unternehmen, deren Geschäftsmodell auf der additiven Fertigung beruht, ausreichende Schutzmöglichkeiten für das in diesem Zusammenhang geschaffene geistige Eigentum?
- Bieten die bestehenden Regelungen einen ausreichenden Schutz vor Nachahmungen bestehender Produkte durch additive Fertigungsverfahren?
- Wer sind im Falle von Rechtsverletzungen die Anspruchsgegner?

Schutzfähigkeit für digitale 3-D-Modelle und Fertigungsvorlagen für die additive Fertigung 1.1

Wird ein neues Produkt für die additive Fertigung entwickelt, ist zunächst ein digitales 3-D-Modell zu erstellen, welches die geometrische Gestalt des Bauteils definiert. Dieses muss für den additiven Fertigungsprozess aufbereitet und mit verfahrens- und anlagenspezifischen Instruktionen verknüpft werden. Das Ergebnis ist eine digitale Fertigungsvorlage, die alle Informationen enthält, um die additive Fertigungsanlage zu steuern und das gewünschte Werkstück physisch herzustellen (Kap. III.1).

Es stellt sich die Frage, ob digitale 3-D-Modelle bzw. die darauf basierenden digitalen Fertigungsvorlagen nach geltendem Immaterialgüterrecht schutzfähig sind. Träfe dies nicht zu, wäre es um den Schutz des geistigen Eigentums schlecht bestellt. In diesem Fall nämlich hätten Unternehmen oder Produktdesigner, die beispielsweise im Internet verbreitete illegal hergestellte Kopien der 3-D-Modelle oder Fertigungsvorlagen für ihre Produkte vorfinden, keine Möglichkeiten, um immaterialgüterrechtlich dagegen vorzugehen. Ein Nachbau der Produkte wäre problemlos möglich. Die Schutzfähigkeit von digitalen Vorlagen für die additive Fertigung ist allerdings noch weitgehend ungeklärt, u.a. auch deshalb, weil Gerichte bisher keine Gelegenheit hatten, sich mit dieser Frage zu beschäftigen.

Die *urheberrechtliche Schutzfähigkeit* hängt maßgeblich davon ab, welcher Werkkategorie nach § 2 Urheberrechtsgesetz (UrhG)[84] die fraglichen digitalen Vorlagen zuzuordnen sind. Weist ein 3-D-Modell bzw. das darin definierte Objekt die erforderliche Individualität und Schöpfungshöhe auf, kommt je nach Inhalt gegebenenfalls ein urheberrechtlicher Schutz als Entwurf zu einem Werk der bildenden Künste bzw. angewandten Kunst oder als Darstellung technischer oder wissenschaftlicher Art in Betracht. Fertigungsvorlagen könnten eventuell einen Schutz als Computerprogramm begründen (Kasten).

84 Urheberrechtsgesetz vom 9. September 1965 (BGBl. I S. 1273), das durch Artikel 7 des Gesetzes vom 4. April 2016 (BGBl. I S. 558) geändert worden ist

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Urheberrechtlicher Schutz für 3-D-Modelle/Fertigungsvorlagen

Schutzfähig sind gemäß § 2 Abs. 1 Nr. 4 UrhG »Werke der bildenden Künste einschließlich der Werke der Baukunst und der angewandten Kunst und Entwürfe solcher Werke«. Als Entwürfe könnten digitale 3-D-Modelle einen urheberrechtlichen Schutz begründen (VDI 2016, S. 35). Dabei dienen Werke der angewandten Kunst einem bestimmten Gebrauchszweck und umfassen daher auch Alltagsgegenstände wie Konsumgüter (Schmuck, Möbel etc.), Werkzeuge oder Maschinen. Deren ästhetische Gestaltung darf allerdings nicht lediglich ihrem Gebrauchszweck geschuldet sein, sondern muss auf einer künstlerischen Leistung beruhen, wobei die Rechtsprechung eher geringe Anforderungen stellt.

Offen ist, ob digitale 3-D-Modelle generell als Darstellungen technischer oder wissenschaftlicher Art gemäß § 2 Abs. 1 Nr. 7 UrhG schutzfähig sind. Dazu müssten sie nach der Rechtsprechung der Informationsvermittlung über den dargestellten Gegenstand im Sinne einer Belehrung oder Unterrichtung dienen. Dies ist, da sie in erster Linie eine additive Fertigungsanlage ansteuern sollen, zumindest zweifelhaft (Leupold/Glossner 2016, S. 88). Selbst wenn digitale 3-D-Modelle als technische Darstellungen schutzfähig wären, wäre deren Schutz nicht sicher, da sich der Schutz auf die Form, nicht aber auf den Inhalt bezieht. Hier ist aber zu unterscheiden: Handelt es sich um eine Darstellung ästhetisch wahrnehmbarer Leistungen, so gibt es keine Unterscheidung zwischen Inhalt und Form, die Darstellung ist schützbar. Bei technischen Leistungen geht es bei der Schutzfähigkeit um die Frage, ob Darstellung und Produkt sich ausschließlich auf die Gebrauchstauglichkeit beziehen; auch wenn dies der Fall ist, kann die Darstellung immer noch geschützt sein, wenn Modifikationen ebenso die Gebrauchstauglichkeit gewährleisten.[85]

Ob digitalen 3-D-Modellen bzw. Fertigungsvorlagen ein urheberrechtlicher Schutz als Computerprogramme gemäß § 2 Abs. 1 Nr. 1 UrhG zukommt, ist umstritten. Für 3-D-Modelle dürfte dies auszuschließen sein, da Dateien, die nicht selbstständig, sondern nur als Inhalte in einem Anwendungsprogramm ausgeführt werden, keinen Schutz als Computerprogramm genießen (VDI 2016, S. 35). Anders ist dies gegebenenfalls für Fertigungsvorlagen zu bewerten, die zusätzlich solche Algorithmen enthalten, die es der additiven Fertigungsanlage ermöglichen, den Inhalt des 3-D-Modells auszuführen. Eine unbefugte Verwendung der Fertigungsvorlage zu Produktionszwecken wäre demnach urheberrechtlich verboten (VDI 2016, S. 34 f.). In der

85 persönliche Mitteilung Prof. Dr. Dr. Ensthaler (9.1.2017)

juristischen Diskussion finden sich aber auch gegenteilige Rechtsauffassungen und Argumente (z.B. Leupold/Glossner 2016, S. 88). Es wird wohl darauf ankommen, ob die Fertigungsvorlage mit der Gerätetreibersoftware als Einheit zu betrachten ist. In diesem Fall ist die für jedes grundsätzlich schutzfähige Programm typische Situation gegeben; die Programme enthalten immer einen softwaretechnischen und einen anwendungsbezogenen Bereich.[86]

Zu prüfen ist ferner, ob für digitale Vorlagen gewerbliche Schutzrechte erlangt werden können. Dies setzt im Gegensatz zum urheberrechtlichen Schutz in der Regel eine (meist kostenpflichtige) Eintragung in ein Register voraus. Im vorliegenden Kontext einschlägig sind insbesondere das Design- und das Patent- bzw. Gebrauchsmusterrecht. Während in der Literatur übereinstimmend davon ausgegangen wird, dass 3-D-Modelle unter bestimmten Voraussetzungen designrechtlich geschützt werden können, ist die patent- bzw. gebrauchsmusterrechtliche Bewertung von 3-D-Modellen und Fertigungsvorlagen noch relativ offen (Kasten). Eine klärende Rechtsprechung ist bislang noch nicht erfolgt.

Gewerbliche Schutzrechte für 3-D-Modelle/Fertigungsvorlagen

Das Designgesetz (DesignG,[87] früher Geschmacksmustergesetz) schützt die äußere Erscheinungsform neuer Produkte. Da 3-D-Modelle die spätere Erscheinungsform der Produkte wiedergeben, kommt für sie ein designrechtlicher Schutz in Betracht. Voraussetzung ist, dass das Design neu ist und Eigenart besitzt. Dies ist der Fall, wenn sich der Gesamteindruck, den das Design beim informierten Benutzer (nicht aber beim Fachmann) hervorruft, von dem Gesamteindruck anderer Designs unterscheidet. Angesichts der neuen Designfreiheiten bei der additiven Fertigung dürfte dies regelmäßig erfüllt sein. Der Inhaber des eingetragenen Designs kann gemäß § 38 DesignG die Nutzung des Designs (hier des 3-D-Modells) zur Herstellung von Produktnachahmungen und deren Vertrieb untersagen (Leupold/Glossner 2016, S. 72 u. 90).

Soweit es sich um »ästhetische Formschöpfungen« handelt, ist nach § 1 Abs. 3 Nr. 2 Patentgesetz (PatG)[88] kein Patentschutz möglich;[89] durch das

86 persönliche Mitteilung Prof. Dr. Dr. Ensthaler (9.1.2017)

87 Designgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 24. Februar 2014 (BGBl. I S. 122), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 4. April 2016 (BGBl. I S. 558) geändert worden ist

88 Patentgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 16. Dezember 1980 (BGBl. 1981 I S. 1), das durch Artikel 2 des Gesetzes vom 4. April 2016 (BGBl. I S. 558) geändert worden ist

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

PatG werden nur technische Leistungen geschützt. Darüber hinaus schützt das PatG nur Erzeugnisse oder Verfahren, wobei es sich bei einem 3-D-Modell nicht schon um ein Erzeugnis im patentrechtlichen Sinne handeln kann, da das im 3-D-Modell abgebildete Erzeugnis erst noch herzustellen ist (Leupold/Glossner 2016, S. 97).

Treiber- und anwendungsbezogene Software können als Verfahrenspatente geschützt werden, soweit Anweisungen enthalten sind, die der Lösung eines konkreten technischen Problems mit technischen Mitteln dienen (Leupold/Glossner 2016, S. 97). Diese Voraussetzung dürften gegebenenfalls solche Fertigungsvorlagen erfüllen, die in Erzeugnissen münden, die ihrerseits patentschutzfähig sind, also technische Erfindungen darstellen, die »neu sind, auf einer erfinderischen Tätigkeit beruhen und gewerblich anwendbar sind« (§ 1 Abs. 1 PatG). In diesem Fall wäre aber zu beachten, dass sich der patentrechtliche Schutz nur auf das Computerprogramm (hier auf die in der Fertigungsvorlage enthaltenen Instruktionen für den maschinellen Fertigungsprozess) bezieht, aber nicht ohne Weiteres auch auf den Nachbau des Produkts in anderer, z. B. konventioneller Weise. Um jeden Nachbau zu verbieten, wäre bei der Formulierung der Schutzansprüche klar herauszustellen, dass nicht nur – über den Programmschutz – ein Verfahrenspatent beansprucht wird, sondern hinsichtlich des zu fertigenden Produkts auch ein Erzeugnisschutz.[90]

Schutz vor Nachahmung bestehender Produkte durch additive Fertigungsverfahren 1.2

Nachahmungen urheberrechtlich geschützter Produkte

Wird ein bestehender Gegenstand, der urheberrechtlichen Schutz genießt, von Dritten reproduziert, sind grundsätzlich die Urheber- und Verwertungsrechte des Rechteinhabers am Original zu berücksichtigen. Auch im Kontext der additiven Fertigung erfordert demnach jede Vervielfältigung zu gewerblichen Zwecken und Verbreitung der Vervielfältigungsstücke (z. B. das Anbieten von Nachahmungen zum Verkauf) die Zustimmung des Rechteinhabers (§§ 15 ff. UrhG) (Solmecke/Kocatepe 2014, S. 780). Im Falle unerlaubter Vervielfältigungen kann der Rechteinhaber vom Verletzer die Beseitigung der Beeinträchtigung, Unterlassung, Schadensersatz bis hin zur Vernichtung der Vervielfältigungsstücke

89 Ähnliches gilt in Bezug auf das Gebrauchsmusterrecht, weswegen auf eine gesonderte Diskussion des Gebrauchsmusterrechts im Folgenden verzichtet wird.

90 persönliche Mitteilung Prof. Dr. Dr. Ensthaler (9.1.2017)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

verlangen, einschließlich der zu ihrer Herstellung verwendeten Vorrichtungen, mithin also auch der additiven Fertigungsanlagen und Fertigungsvorlagen (Leupold/Glossner 2016, S. 105).

Erfolgt die Vervielfältigung hingegen nicht zu kommerziellen, sondern zu rein privaten Zwecken, greift die sogenannte Privatkopierschranke (§ 53 UrhG). Laut dieser sind einzelne Vervielfältigungen eines urheberrechtlich geschützten Werkes zum privaten Gebrauch auch ohne die Zustimmung des Urhebers zulässig, sofern sie nicht zu Erwerbszwecken dienen und sofern zur Vervielfältigung keine offensichtlich rechtswidrig hergestellte oder öffentlich zugänglich gemachte Vorlage verwendet wurde. Letztere Einschränkung verbietet insbesondere die additive Herstellung von Kopien urheberrechtlich geschützter Gegenstände auf der Grundlage von 3-D-Modellen bzw. Fertigungsvorlagen, die zu diesem Zweck ohne die Zustimmung des Rechteinhabers im Internet angeboten werden (VDI 2014, S. 14). Hier einschlägig sind etwa Tauschbörsen im Internet, da dort regelmäßig nicht davon auszugehen ist, dass die Anbieter auch die Rechteinhaber sind (Solmecke/Kocatepe 2014, S. 779).

Zur Vervielfältigung bestehender Gegenstände mit additiven Fertigungsverfahren ist zunächst ein 3-D-Modell nach der Vorlage des Originals mithilfe eines 3-D-Scanners (3-D-Digitalisierung) oder durch manuelle Nachkonstruktion mit einer CAD-Software herzustellen. Wird eine CAD-Software benutzt, dürfte eine exakte digitale Kopie nur bei einfach gestalteten Ausgangsobjekten überhaupt möglich sein, sodass zwischen 3-D-Modell und Original regelmäßig kleinere oder größere Abweichungen bestehen. Rechtlich ist dies von Belang, weil dann nicht in jedem Fall eine Vervielfältigungshandlung gemäß § 16 UrhG vorliegen muss. Es könnte sich auch um eine Bearbeitungshandlung gemäß § 23 UrhG (die ebenfalls der Zustimmung des Rechteinhabers bedarf, und zwar auch dann, wenn dies zu rein privaten Zwecken erfolgt) oder aber um eine freie Benutzung gemäß § 24 UrhG handeln.[91] Die jeweils im Einzelfall vorzunehmende Abgrenzung zwischen Vervielfältigung, Bearbeitung und freier Benutzung ist schwierig (VDI 2014, S. 14, 2016, S. 36). Produktpiraten könnten sich dies zunutze machen, um durch bewusst vorgenommene kleine Änderungen in den 3-D-Modellen (und den Nachahmungen) Urheberrechtsverletzungen zu verschleiern bzw. deren Nachweis zu erschweren (vergleichbar etwa dem Umformulieren von Texten, um Plagiate zu verschleiern).

Ungeklärt ist die Frage, ob bereits die Erstellung und Verbreitung des 3-D-Modells eines geschützten Gegenstandes eine Urheberrechtsverletzung begründet, gegen welche der Rechteinhaber vorgehen kann, oder erst dessen materielle Reproduktion. Laut VDI (2014, S. 14) ist zumindest die 3-D-Digitalisierung als

91 Während bei einer Bearbeitungshandlung trotz Veränderungen kein eigenes neues Werk geschaffen wird, dient das Original bei der freien Benutzung lediglich als Anregung für die Schaffung eines selbstständigen Werks (VDI 2014, S. 14).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vervielfältigungshandlung im Sinne des § 16 UrhG zu qualifizieren und daher – wenn dies in kommerzieller Absicht erfolgt – grundsätzlich nur mit Zustimmung des Rechteinhabers am Original zulässig. Eine 3-D-Digitalisierung für den Privatgebrauch ist hingegen im Rahmen des § 53 UrhG gestattet, die erstellten 3-D-Modelle dürfen jedoch nicht im Internet verbreitet werden (§ 53 Abs. 6 UrhG). Wird das 3-D-Modell mithilfe von CAD-Software erstellt, wäre laut VDI (2014, S. 14) wiederum im Einzelfall nach Vervielfältigung, Bearbeitung und freier Benutzung zu trennen.

Nachahmungen von Produkten mit gewerblichen Schutzrechten

Werden Produkte mithilfe additiver Fertigungsverfahren nachgeahmt, können neben dem Urheberrecht auch gewerbliche Schutzrechte berührt sein, u.a. das Marken-, Design- und Patent- bzw. Gebrauchsmusterrecht. Rechtsverstöße gegen gewerbliche Schutzrechte setzen zwingend ein geschäftliches Handeln voraus (Solmecke/Kocatepe 2014, S. 779 u. 781).

Soweit erkennbar stellen sich hier, zumindest was die materielle Reproduktion anbelangt, keine grundsätzlich neuen Rechtsfragen. Wenn etwa Produkte namhafter Marken (z.B. eine mit dem Apfel versehene Handyhülle der Marke Apple) kopiert und vertrieben werden, liegt ein Verstoß gegen das Markenrecht vor, unabhängig davon, ob dazu additive oder konventionelle Fertigungsverfahren benutzt wurden (Solmecke/Kocatepe 2014, S. 781). Allerdings kann eine Häufung solcher Fälle infolge der additiven Fertigung erwartet werden.

Klärungsbedarf kann gegebenenfalls für spezifische Fallkonstellationen erwartet werden. Beispielsweise ist die Grenze zwischen kommerziellem und privatem Handeln nicht immer offensichtlich (Letzteres verstößt nicht gegen gewerbliche Schutzrechte). So kann eine Privatperson unter Umständen bereits dann gegen das Markenrecht verstoßen, wenn sie mit dem eigenen 3-D-Drucker ein markenrechtlich geschütztes Produkt reproduziert, sich das Replikat aber nicht zu Hause, sondern im gewerblich genutzten Büro auf den Schreibtisch stellt. Denn laut Solmecke und Kocatepe (2014, S. 781) könnte dies bereits als Handeln im »geschäftlichen Verkehr« aufgefasst werden und eine Haftung auslösen. Dazu ist allerdings bislang noch keine klärende Rechtsprechung erfolgt.

Mangels gerichtlicher Entscheidungen teilweise ungeklärt ist – wie im Falle des Urheberrechts auch – die Frage, ob bereits die Erstellung und Verbreitung von 3-D-Modellen geschützter Gegenstände eine Verletzung gewerblicher Schutzrechte begründen (Kasten). Dies ist dann von Bedeutung, wenn Rechteinhaber gegen unerlaubt erstellte und z.B. auf Internetplattformen angebotene 3-D-Modelle von geschützten Erzeugnissen vorgehen wollen.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Verletzungen gewerblicher Schutzrechte durch 3-D-Modelle?

Da das Designrecht jede Verkörperung des Designs schützt, wird in der Literatur argumentiert, dass bereits die Erstellung des 3-D-Modells als eine dem Vertrieb der späteren Reproduktion vorgeschaltete produktbezogene Handlung eine Rechtsverletzung darstellt (Bräutigam/Klindt 2015, S. 71).

Markenrechtsverletzungen setzen voraus, dass es zu Verwechslungen mit der eingetragenen Marke kommen kann (Nitz 2015, S. 297). Dies dürfte zumindest dann zutreffen, wenn die fraglichen 3-D-Modelle die geschützte Marke selbst verkörpern (z.B. den Mercedes-Stern) oder im Internet unter Verwendung des Markennamens angeboten werden (Leupold/Glossner 2016, S. 100). Für die Praxis würde Letzteres bedeuten, dass etwa 3-D-Modelle von Ersatzteilen »für das Auto der Marke XY« nicht ohne Zustimmung der Markeninhaber angeboten werden dürften (Nitz 2015, S. 298).

Die Erstellung von 3-D-Modellen eines patentrechtlich geschützten Erzeugnisses kann laut überwiegender Ansicht nicht schon als Benutzung des Patents gelten und folglich auch nicht als patentverletzend behandelt werden (Leupold/Glossner 2016, S. 97 f.). Unter Umständen kann jedoch deren Verbreitung eine mittelbare Patentverletzung begründen, gegen welche die Rechteinhaber vorgehen können. Demnach ist es gemäß § 10 Abs. 1 PatG Dritten verboten, ohne Zustimmung des Rechteinhabers unberechtigten Personen solche Mittel anzubieten oder zu liefern, die sich auf ein wesentliches Element der Erfindung beziehen und die offensichtlich dazu bestimmt sind, für die Benutzung der Erfindung verwendet zu werden. Dass 3-D-Modelle auch zu diesen Mitteln gehören, kann zwar vermutet werden, muss aber – da hierunter bisher regelmäßig nur körperliche Gegenstände und nicht in Dateien verkörperte Modelle verstanden wurden – durch die Rechtsprechung geklärt werden (Bräutigam/Klindt 2015, S. 71 f.).

Wettbewerbsrecht

Werden Produkte, die weder urheberrechtliche noch gewerbliche Schutzrechte genießen, unerlaubt nachgeahmt, kann schließlich noch die Geltendmachung einer unlauteren geschäftlichen Handlung gemäß dem Gesetz gegen den unlauteren Wettbewerb (UWG)[92] in Betracht kommen. Das UWG greift nur, wenn im geschäftlichen Verkehr und nicht zu rein privaten Zwecken gehandelt wird. Das Anbieten einer Nachahmung etwa im Internet ist dabei nicht per se verbo-

92 Gesetz gegen den unlauteren Wettbewerb in der Fassung der Bekanntmachung vom 3. März 2010 (BGBl. I S. 254), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 17. Februar 2016 (BGBl. I S. 233) geändert worden ist

ten, sondern verstößt dann gegen den lauteren Wettbewerb, wenn der Käufer über die Herkunft getäuscht wird, der Ruf des Originalprodukts ausgenutzt wird oder die für die Nachahmung erforderlichen Kenntnisse oder Unterlagen unredlich erschlichen wurden (Leupold/Glossner 2016, S. 76 ff.).

Im vorliegenden Kontext ist insbesondere letztere Bedingung von Relevanz, da laut Leupold und Glossner (2016, S. 80) zu den erforderlichen Kenntnissen oder Unterlagen auch digitale Vorlagen für die additive Fertigung gezählt werden dürfen. Wenn also beispielsweise Mitarbeiter eines Betriebes 3-D-Modelle bzw. Fertigungsvorlagen durch Verrat von Betriebsgeheimnissen entwenden bzw. Betriebsfremde die Daten durch Diebstahl oder Spionage erlangen und damit gefertigte Produktnachahmungen zum Kauf anbieten, so stellt dies einen Verstoß gegen den lauteren Wettbewerb dar (Solmecke/Kocatepe 2014, S. 780). Vorstellbar ist auch, dass ein Mitarbeiter digitale Vorlagen, die ihm zur innerbetrieblichen Nutzung überlassen wurden, nach Beendigung des Arbeitsverhältnisses zur Herstellung von Nachahmungen verwendet oder zu diesem Zweck unbefugt an Dritte weitergibt. In diesem Fall könnte ein wettbewerbswidriger Vertrauensbruch geltend gemacht werden (Leupold/Glossner 2016, S. 81).

Von großer Bedeutung für den Nachahmungsschutz ist das Verbot der sogenannten unmittelbaren Übernahme fremdgeschaffener Produkte. In der Literatur besteht Streit darüber, ob dieses Verbot nach der Novellierung des UWG noch Bestand hat, weil es nicht im Katalog des § 4 UWG aufgeführt ist. Die unmittelbare Leistungsübernahme stellt das wohl wettbewerbsfeindlichste Schmarotzen an fremden Leistungen dar. Daher wird die Rechtsprechung diese aller Wahrscheinlichkeit nach auch künftig über die Generalklausel des § 3 UWG sanktionieren.[93]

Mögliche Anspruchsgegner 1.3

Werden Schutzrechte Dritter verletzt, haftet als Täter auf Unterlassung und/oder Schadensersatz zunächst derjenige, der die Verletzungshandlung selbst begeht oder diese veranlasst hat. Letzteres ist etwa dann relevant, wenn ein Produktnachahmer ohne Zustimmung des Rechteinhabers Fertigungsvorlagen von geschützten Gegenständen erstellt, die er einem Auftragsfertiger mit dem Auftrag zur Fertigung überlässt: Unmittelbarer Anspruchsgegner bleibt auch in diesem Fall der Ersteller der rechtsverletzenden Fertigungsvorlage (Leupold/Glossner 2016, S. 109 f.).

93 persönliche Mitteilung Prof. Dr. Dr. Ensthaler (9.1.2017)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Rechtslage für Auftragsfertiger

Freilich entbindet dies Auftragsfertiger nicht von jeder Verantwortung. Auch wenn es noch keine Rechtsprechung speziell zur additiven Fertigung gibt, dürfte die Rechtslage nicht anders zu beurteilen sein, als dies durch die Kopierläden-Entscheidung[94] des BGH erfolgt ist. Gemäß dieser haften Betreiber von Kopierläden, die ihren Kunden lediglich Zugang zu Kopiergeräten gewähren, nur für Vorsatz und grobe Fahrlässigkeit. Wenn aber Mitarbeiter selbst urheberrechtsverletzende Aufträge durchführen, haften sie genauso wie jeder andere (Solmecke/Kocatepe 2014, S. 872).

Rechtliche Bedeutung erlangt dies vor allem im Hinblick auf die stetig wachsende Zahl an FabLabs (Kap. II.2), die jedem einen Zugang zu additiven Fertigungsanlagen ermöglichen und – so kann zumindest vermutet werden – künftig auch von Produktpiraten in wachsendem Maße dazu missbraucht werden könnten, um Produktnachahmungen selber herzustellen bzw. durch Mitarbeiter herstellen zu lassen (Leupold/Glossner 2016, S. 119). Übertragen auf FabLabs bedeutet die Kopierläden-Entscheidung, dass den Betreibern zwar Maßnahmen wie das Anbringen deutlich sichtbarer Hinweise auf die Verpflichtung ihrer Kunden zur Beachtung Rechte Dritter zugemutet werden können, nicht jedoch eine generelle Kontrollpflicht, die etwa einen Einblick in die mitgebrachten digitalen Vorlagen umfassen würde (Solmecke/Kocatepe 2014, S. 872). Zum Schutz der Mitarbeiter bieten sich für FabLabs vertragliche Absicherungen gegenüber ihren Kunden an, dass durch die Fertigungsaufträge keine Rechte Dritter verletzt werden (Leupold/Glossner 2016, S. 119).

Wenn allerdings Auftragsfertiger bzw. FabLab-Betreiber offensichtlich rechtswidrige Produktanfertigungen nicht verhindern (z.B. wenn ein Kunde in großer Zahl Handyhüllen mitsamt Markenlogo selber fertigt bzw. fertigen lassen möchte), könnten sie gegebenenfalls im Wege der Störerhaftung auf Unterlassung (nicht aber auf Schadensersatz) in Anspruch genommen werden. Eine Störerhaftung setzt generell die Verletzung von Prüfpflichten voraus. Welche Prüfpflichten in diesem Zusammenhang den Auftragsfertigern zugemutet werden können, ist bisher von der Rechtsprechung allerdings noch nicht konkretisiert worden (Solmecke/Kocatepe 2014, S. 782).

Rechtslage für Betreiber von Internetplattformen

Für die Rechteinhaber dürfte es regelmäßig schwer sein, die unmittelbaren Verletzer zu ermitteln, etwa wenn die schutzrechtsverletzenden 3-D-Modelle bzw. Fertigungsvorlagen auf Internetplattformen wie Tauschbörsen angeboten wer-

94 BGH, 9.6.1983 – I ZR 70/81, NJW 1984, 1106 – Kopierläden

den. Die Frage, ob in diesen Fällen die Betreiber der Internetplattformen in Anspruch genommen werden können, stellt sich aber nicht erst im Kontext der additiven Fertigung. Einschlägig sind hier die im Rahmen von Onlinemarktplätzen für Waren (eBay, Amazon etc.) entwickelten Regelungen.

Demnach haften Plattformbetreiber nicht unmittelbar als Täter oder Teilnehmer für Schutzrechtsverletzungen der Plattformnutzer. So hat beispielsweise der Europäische Gerichtshof klargestellt, dass Plattformbetreiber alleine durch die Zurverfügungstellung der technischen Mittel zum Verkauf markenverletzender Waren selbst keine Markenverletzung begehen. Auch eine Beihilfehaftung der Plattformbetreiber für Markenrechtsverletzungen Dritter hat der BGH abgelehnt, weil es hier an einem bewussten und gewollten Zusammenwirken mit dem eigentlichen Täter fehle (Leupold/Glossner 2016, S. 114).

Unter bestimmten Voraussetzungen kommt jedoch eine mittelbare Haftung (Störerhaftung) des Plattformbetreibers in Betracht. Notwendig dafür ist allerdings, dass der Plattformbetreiber auf den Rechtsverstoß hingewiesen wird, was aber regelmäßig nicht erfolgen dürfte, weil der Rechteinhaber gar keine Kenntnis davon hat. Denn gemäß § 10 Abs. 1 Telemediengesetz (TMG)[95] sind Plattformbetreiber für fremde Informationen so lange nicht verantwortlich, wie sie keine Kenntnis von der Rechtsverletzung haben und ihnen auch keine Tatsachen oder Umstände bekannt sind, aus denen dies offensichtlich wird. Auch sind Plattformbetreiber nicht dazu verpflichtet, die Informationen zu überwachen oder aktiv nach Umständen zu forschen, die auf eine rechtswidrige Tätigkeit hinweisen (§ 7 Abs. 2 TMG). Erlangt der Plattformbetreiber jedoch Kenntnis des Rechtsverstoßes, muss er unverzüglich die Information entfernen bzw. den Zugang zu ihnen sperren (Solmecke/Kocatepe 2014, S. 783).[96]

Zwischenfazit 1.4

Festzuhalten bleibt, dass in Bezug auf die Schutzfähigkeit von 3-D-Modellen bzw. Fertigungsvorlagen für die additive Fertigung wie auch hinsichtlich des Schutzes bestehender Produkte vor Nachahmung mithilfe additiver Fertigungs-

95 Telemediengesetz vom 26. Februar 2007 (BGBl. I S. 179), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 21. Juli 2016 (BGBl. I S. 1766) geändert worden ist

96 Ein Gesetzentwurf der Bundesregierung vom 18.11.2015 (Bundesregierung 2015) intendierte, die Lage der Rechteinhaber zu verbessern. Er sah vor, die Kenntnis der Rechtsverletzung beim Plattformbetreiber dann zu vermuten, wenn u.a. die Speicherung der weit überwiegenden Zahl der Informationen rechtswidrig erfolgt oder keine Möglichkeit besteht, rechtswidrige Inhalte durch den Rechteinhaber entfernen zu lassen. Im parlamentarischen Beratungsprozess wurde dies jedoch fallen gelassen mit Verweis darauf, dass dies auf europäischer Ebene adressiert werden solle (AWE 2016, S. 11).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

verfahren eine in vielen Punkten noch unklare Rechtslage vorherrschend ist und Klärungsbedarf besteht. Aus heutiger Sicht ist dies aber weniger auf Gesetzeslücken im bestehenden Immaterialgüterrecht zurückzuführen als vielmehr dem Umstand geschuldet, dass die Rechtsprechung bisher keine Gelegenheit hatte, sich mit diesen Fragen zu beschäftigen und im Wege der Auslegung für Rechtssicherheit zu sorgen. Dazu reichen nach vorherrschender Meinung die vorhandenen Regelungen des Immaterialgüterrechts aus, sodass derzeit diesbezüglich kein dringender gesetzgeberischer Handlungsbedarf zu konstatieren ist. Dies könnte sich allerdings dann ändern, wenn die ersten komplexeren Streitfälle vor Gericht verhandelt werden und mögliche Gesetzeslücken erkennen lassen.

Vor dem Hintergrund, dass additive Fertigungsverfahren zunehmend auch Privatpersonen in die Lage versetzen, Vervielfältigungen von geschützten materiellen Gegenstände herzustellen, und dies – sofern keine kommerziellen Absichten verfolgt werden – gemäß Immaterialgüterrecht in bestimmten Grenzen auch ohne eine Zustimmung der Rechteinhaber erlaubt ist, wird gegebenenfalls zu diskutieren sein, ob diese Privilegien für Privatpersonen im Kontext der additiven Fertigung einzuschränken sind. Denn sollten Verbraucher künftig vermehrt Alltagsgegenstände für den Privatgebrauch nach der Vorlage von Originalprodukten selber herstellen (z.B. Geschirr, Möbel, Spielzeug etc.), kann dies durchaus zu einem beträchtlichen wirtschaftlichen Schaden für die Originalhersteller führen. Ob bzw. in welchem Ausmaß dies tatsächlich eintritt und ob sich Originalhersteller in diesem Fall alleine durch neue Geschäftsmodelle (z.B. indem sie auch digitale Vorlagen für ihre Produkte anbieten) erfolgreich behaupten können, bleibt abzuwarten. Alternativ könnte über das Modell einer Pauschalabgabe bei den Herstellern von industriellen additiven Fertigungsanlagen und 3-D-Druckern für Privatanwender nachgedacht werden, wie sie auf der Grundlage von § 54 UrhG zur Vergütung urheberrechtlicher Ansprüche auch bei Kopiergeräten, 2-D-Druckern, MP3-Playern etc. erhoben wird (Leupold/Glossner 2016, S. 121).

2. Produktsicherheit

Wie alle neuen Produkte, die im Rahmen einer Geschäftstätigkeit in den Verkehr gebracht werden, müssen auch additiv gefertigte Produkte den vom Gesetzgeber festgelegten Anforderungen an die Produktsicherheit entsprechen. Einschlägig ist hier in erster Linie das Produktsicherheitsgesetz (ProdSG),[97] laut welchem nur solche Produkte auf dem Markt bereitgestellt werden dürfen, die

97 Produktsicherheitsgesetz vom 8. November 2011 (BGBl. I S. 2178, 2179; 2012 I S. 131), das durch Artikel 435 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

»bei bestimmungsgemäßer oder vorhersehbarer Verwendung die Sicherheit und Gesundheit von Personen nicht gefährden« (§ 3 Abs. 2 ProdSG).[98] So müssen beispielsweise Produkte, deren Verwendung besonderen Regeln unterliegt, mit einer entsprechenden Gebrauchsanleitung versehen werden. Bei Produkten, die für den (End-)Verbraucher bestimmt sind, müssen die Hersteller u.a. den Verbraucher über Produktrisiken informieren, das Produkt mit ihren Kontaktdaten kennzeichnen sowie die Identifizierbarkeit des Produkts sicherstellen (§ 6 ProdSG). Auch sind unverzüglich die zuständigen Behörden zu informieren, wenn von einem Produkt ein Risiko für die Sicherheit und Gesundheit von Personen ausgeht. Für bestimmte Produktkategorien sind darüber hinaus die dem ProdSG nachgeordneten Verordnungen zu beachten, etwa die Verordnung über die Sicherheit von Spielzeug, laut welcher Spielzeug erst dann in den Verkehr gebracht werden darf, nachdem es umfassende Sicherheitsprüfungen hinsichtlich Entflammbarkeit und anderer Gefahren bestanden hat.

Die Einhaltung der Vorschriften wird durch die Marktüberwachungsbehörden kontrolliert, denen bei begründeten Verdachtsfällen auf Verstöße gemäß § 26 Abs. 2 ProdSG ein breites Maßnahmenspektrum zur Verfügung steht, um mögliche Gefahren abzuwenden (Leupold/Glossner 2016, S. 171 ff.). Unter anderem sind sie dazu befugt, Sicherheitsüberprüfungen, das Anbringen von Produktwarnungen oder die Warnung der Öffentlichkeit vor den Risiken anzuordnen, die Bereitstellung des Produkts auf dem Markt zu verbieten, die Rücknahme oder den Rückruf des Produkts zu verlangen oder gar die Unschädlichmachung des Produkts anzuordnen (§ 26 Abs. 2 ProdSG).

Als Produkte gelten laut § 2 Nr. 22 ProdSG »Waren, Stoffe oder Zubereitungen, die durch einen Fertigungsprozess hergestellt worden sind«. Es ist also völlig unerheblich, ob die Produkte mit industriellen additiven Fertigungsanlagen oder einfachen 3-D-Druckern hergestellt wurden oder ob es sich um Prototypen, Einzelanfertigungen oder Serienprodukte handelt (Leupold/Glossner 2016, S. 171 ff.). Dies vor Augen ergeben sich folgende drei Problemstellungen.

Unklare Pflichtenzuordnung bei der Gewährleistung der Produktsicherheit

Die gesetzlich geregelten Pflichten zur Gewährleistung der Produktsicherheit richten sich in erster Linie an die Hersteller der Produkte. Weil sich aber bei der additiven Fertigung regelmäßig viele unterschiedliche Akteure am Herstellungsprozess beteiligen (z.B. wenn Unternehmen die Erstellung der digitalen Ferti-

98 Ausdrücklich vom Anwendungsbereich des ProdSG ausgenommen sind u.a. Medizinprodukte, deren Sicherheitsanforderungen durch andere Normen geregelt sind wie das Gesetz über Medizinprodukte (dazu Leupold/Glossner 2016, S. 182 ff.).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

gungsvorlagen und/oder den additiven Fertigungsprozess auslagern), ist es oft schwierig, den eigentlichen Hersteller des Produkts zu benennen und die Verantwortlichkeiten für die Produktsicherheit klar zu regeln (Leupold/Glossner 2016, S. 175). Unklare Pflichtenzuordnungen könnten letztlich der Nichteinhaltung der gesetzlich geregelten Pflichten Vorschub leisten. Die Frage nach dem Hersteller eines additiv gefertigten Produkts wird im nachfolgenden Kapitel VI.3 ausführlich diskutiert.

Individualisierte Produkte

Wie im Kontext einer individualisierten Produktion von additiv gefertigten Einzelstücken die Herstellerpflichten an die Produktsicherheit eingehalten werden können (z.B. in Bezug auf Dokumentationspflichten oder Sicherheitsüberprüfungen), ist noch fraglich. So sind beispielsweise gängige Methoden zur Qualitätssicherung (u.a. zerstörende Bauteilprüfungen, zerstörungsfreie Mess- und Prüfverfahren) bei Einzelanfertigungen nicht bzw. nur mit großem Aufwand anwendbar (VDI 2016, S. 30). Dies stellt neben den Herstellern auch Prüfgesellschaften, die die Einhaltung von Sicherheitsnormen überwachen, und schließlich auch die Marktüberwachungsbehörden vor große Herausforderungen.

Erschwerend tritt hinzu, dass es aufgrund der noch vergleichsweise jungen Technologie bisher weitgehend an Normen und technische Spezifikationen fehlt (DIN-Normen, ISO-Vorschriften, VDI-Richtlinien etc.), an welchen sich Hersteller, Prüfgesellschaften und Marktüberwachungsbehörden orientieren könnten. Diese stellen generell wichtige Hilfsmittel dar, wenn es darum geht, den Sollzustand eines Produkts zu beschreiben und gegebenenfalls Abweichungen davon festzustellen (LASI 2014, S. 33). Zwar gibt es erste Bemühungen, auch für die additive Fertigung ein entsprechendes technisches Regelwerk zu erarbeiten (hier zu nennen sind insbesondere die Veröffentlichungen des VDI-Fachausschusses »Additive Manufacturing«),[99] gleichwohl ist hier noch ein weiter Weg zu gehen.

Neue Akteure als Produkthersteller

Additive Fertigungsverfahren bieten neuen Akteuren, die bisher nicht als Produzenten aufgetreten sind, einen vergleichsweise einfachen Einstieg in eine eigene Fertigung. Zu denken ist etwa an ein Designbüro, das Produkte nach eigenen Entwürfen nunmehr auch gleich selber herstellt und vertreibt. Durch die zunehmende Verbreitung von 3-D-Druckern im Heimbereich treten aber auch vermehrt Privatpersonen als Produkthersteller auf, indem sie z.B. damit gefertigte Gegenstände über das Internet zum Verkauf anbieten. Diese Akteure ste-

99 www.vdi.de/3404 sowie www.vdi.de/3405 (27.5.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

hen wie jedes Unternehmen grundsätzlich in der Pflicht, die gesetzlich geregelten Anforderungen an die Produktsicherheit einzuhalten.

Viele dieser neuen Akteure und insbesondere Privatpersonen dürften allerdings mit den geltenden Vorschriften nur unzureichend vertraut sowie oft auch gar nicht in der Lage sein, die ihnen obliegenden Pflichten regelkonform einzuhalten (z.B. in Bezug auf Informationspflichten über Produktrisiken oder erforderliche Sicherheitsüberprüfungen), weil es ihnen an technischem Sachverstand und den erforderlichen Mitteln fehlt.

Haftungsrechtliche Aspekte 3.

Haftungsrechtliche Fragestellungen sind im Kontext der additiven Fertigung nicht anders zu behandeln, als dies bei Erzeugnissen aus der konventionellen Fertigung erforderlich ist, nämlich nach den Grundsätzen der beiden gleichberechtigten Regime des deutschen Haftungsrechts: Dies ist zum einen die verhaltensbezogene *Produzentenhaftung* nach den Bestimmungen des Bürgerlichen Gesetzbuches (BGB) und zum anderen die verschuldensunabhängige *Produkthaftung* nach dem Produkthaftungsgesetz (ProdHaftG[100], Kasten).

Produzentenhaftung versus Produkthaftung

Die Produzentenhaftung setzt einen vorsätzlichen oder fahrlässigen Verstoß gegen die Verkehrssicherungspflichten voraus, die dem Hersteller zwecks Abwehr von Gefahrenquellen auferlegt werden. Demnach hat dieser den Produktionsablauf so zu organisieren und zu überwachen, dass Fehler in der Konstruktion und der Fabrikationen vermieden bzw. entdeckt werden, und er muss den Verbraucher vor möglichen Gefahren aus der Verwendung seines Produkts warnen (Leupold/Glossner 2016, S. 258 f.). Demgegenüber gewährt die Produkthaftung einen verschuldensunabhängigen Anspruch bei Produktfehlern, welche immer dann vorliegen, wenn ein Produkt »nicht die Sicherheit bietet, die unter Berücksichtigung aller Umstände … berechtigterweise erwartet werden kann« (§ 3 ProdHaftG). Die maßgeblichen Sicherheitserwartungen richten sich dabei grundsätzlich nach denselben Maßstäben wie bei der Produzentenhaftung (Leupold/Glossner 2016, S. 224), sodass – zumindest was den Fehlerbegriff angeht – in der Praxis zwischen den beiden Haftungssystemen oft kein Unterschied besteht (VDI 2014, S. 16).

100 Produkthaftungsgesetz vom 15. Dezember 1989 (BGBl. I S. 2198), das zuletzt durch Artikel 180 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Die Fragen sind daher vielfach nicht neu. Allerdings rücken einige Besonderheiten der additiven Fertigung (hochgradig virtueller Fertigungsprozess, Herstellung komplexer und individualisierter Produkte, Anwendung der Verfahren im privaten Bereich) bisher weniger beachtete Aspekte des Haftungsrechts in den Fokus, sodass sich bereits bekannte Fragen verschärft oder neu akzentuiert stellen.

Fehlerhafte Produkte aus additiver Fertigung 3.1

In der Rechtsprechung und der Literatur hat sich die Einteilung der Pflichten an die Hersteller zur Vermeidung von Gefahrenquellen in die wesentlichen Bereiche Konstruktion, Fabrikation und Instruktion herausgebildet. Diese Einteilung lässt sich im Kontext der additiven Fertigung aufrechterhalten.

Fehler in der Konstruktion

Ein Konstruktionsfehler liegt vor, wenn ein Produkt infolge einer fehlerhaften technischen Konzeption für eine gefahrlose Nutzung ungeeignet ist. Dabei ist auf den Sicherheitsstandard abzustellen, der zum Zeitpunkt des Inverkehrbringens des Produkts konstruktiv möglich und dem Hersteller zumutbar ist. Als Maßstab gilt hier nach herrschender Meinung der Stand von Wissenschaft und Technik, in der Praxis aber stellen die allgemein anerkannten Regeln der Technik[101] und spezialgesetzliche Regelungen (z.B. dem ProdSG nachgeordnete Verordnungen) den absoluten Mindeststandard dar (Leupold/Glossner 2016, S. 229 ff. u. 261).

Mögliche Konstruktionsfehler dürften häufiger Gegenstand haftungsrechtlicher Streitfälle im Kontext der additiven Fertigung sein. Denn gerade in der nahezu beliebig komplexen Bauteilgeometrie und der Möglichkeit, in Serienproduktionen jedes einzelne Produkt mit individuellen Merkmalen auszustatten, liegt das Potenzial der additiven Fertigung, aber gleichzeitig auch das Risiko für Mängel in der Konstruktion, wenn die neuen Designfreiheiten ohne die erforderliche Sorgfalt angewendet bzw. über Gebühr ausgereizt werden (Leupold/Glossner 2016, S. 260). So fehlt es derzeit noch überwiegend an Erfahrungen in Bezug auf neuartige Konstruktionen, aber auch an kodifizierten technischen Regeln und Standards. Darüber hinaus dürfte es für neue Akteure und insbesondere für Privatpersonen, die erst durch die additive Fertigung zu Produkt-

101 Nach der Rechtsprechung handelt es sich bei den allgemein anerkannten Regeln der Technik um jene Regeln, die in der Praxis durchweg bekannt sind und sich aufgrund fortlaufender praktischer Erfahrung bewährt haben. Der Stand von Wissenschaft und Technik berücksichtigt darüber hinaus auch aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse (Leupold/Glossner 2016, S. 231 f.)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

herstellern werden, regelmäßig schwierig sein, die Ordnungsgemäßheit der Konstruktion nach den anerkannten Regeln der Technik (bzw. nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik) zu gewährleisten.

Fehler in der Fabrikation

Fabrikationsfehler können bei der Vorbereitung, Durchführung oder Nachbearbeitung des Herstellungsvorgangs auftreten und betreffen im Gegensatz zu Konstruktionsfehlern nicht die ganze Serie, sondern nur einzelne Exemplare oder Chargen der Produkte (Leupold/Glossner 2016, S. 235 f.). Bei der additiven Fertigung sind Konstruktion und Fabrikation allerdings nicht immer klar voneinander zu trennen, da digitale Fertigungsvorlagen, deren Erstellung eher der Konstruktionsphase zuzurechnen ist, die wesentlichen Fabrikationselemente bereits enthalten (z. B. VDI 2014, S. 16). Entscheidend ist allerdings, dass auch beim eigentlichen maschinellen additiven Fertigungsprozess und in der Nachbearbeitung Fehler auftreten können – etwa wenn es einmalig zu einer Lieferung minderwertigen Materials kommt, Temperaturschwankungen während des Fertigungsprozesses auftreten oder die manuelle Nachbearbeitung mangelhaft ausgeführt wird (Leupold/Glossner 2016, S. 235).

Betreiber additiver Fertigungsanlagen haben demnach den maschinellen Fertigungsprozess so zu gestalten, dass es zu keinen Fabrikationsfehlern kommt, und – wenn sich Fabrikationsfehler nicht ganz vermeiden lassen – durch Qualitätskontrollen dafür zu sorgen, dass keine fehlerhaften Produkte in den Verkehr gelangen. Dass einige additive Fertigungsverfahren sehr empfindlich auf äußere Bedingungen oder Qualitätsunterschiede im Ausgangsmaterial reagieren und eine gleichbleibende Bauteilqualität noch ein generelles Problem darstellt (Kap. III.6), unterstreicht die prinzipielle Bedeutung von Qualitätssicherungsmaßnahmen. Welche Maßstäbe hier speziell für Erzeugnisse aus der additiven Fertigung anzulegen sind, muss von der Rechtsprechung allerdings noch konkretisiert werden. Diese hängen auch vom Ausmaß des jeweiligen Gefahrenpotenzials und damit von den Umständen des Einzelfalls ab (Leupold/Glossner 2016, S. 235).[102]

Instruktionsfehler

Dem Hersteller obliegt die Pflicht, den Nutzer auf alle verbleibenden Gefahren bei der Verwendung des Produkts hinzuweisen. Dabei sind nicht nur die Risi-

102 Beispielsweise fordert die Rechtsprechung händische Kontrollen bzw. Sichtkontrollen für Getränkeflaschen, die aufgrund von Haarrissen splittern und zu schweren Verletzungen führen können (Leupold/Glossner 2016, S. 235).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

ken eines bestimmungsgemäßen und naheliegenden Gebrauchs zu berücksichtigen, sondern es müssen auch mögliche Gefahren durch einen vorhersehbaren versehentlichen Fehlgebrauch und einen naheliegenden Missbrauch antizipiert werden. Die Frage, welche Handlungen darunter fallen bzw. was als allgemeiner Erfahrungsschatz beim Nutzer vorausgesetzt werden darf und daher keiner Warnung bedarf, ist regelmäßig schwer und nur im Einzelfall zu beantworten (Leupold/Glossner 2016, S. 237 f.).

Produktbeobachtungs- und Reaktionspflichten

Bei der Produzentenhaftung endet die Verantwortung des Herstellers nicht mit dem Inverkehrbringen des Produkts, sondern beinhaltet darüber hinaus eine Produktbeobachtungs- und Reaktionspflicht. Demnach ist er verpflichtet, das eigene Produkt, den Produkt- und Produktzubehörmarkt wie auch die technischen und rechtlichen Entwicklungen aktiv zu beobachten und gegebenenfalls – wenn ihm (potenzielle) Gefahren durch seine Produkte bekannt werden – angemessen zu reagieren. Der Umfang der Reaktionspflicht reicht je nach Gefährdungspotenzial von der Warnung der Produktnutzer über einen Verkaufsstopp bis zum Rückruf des Produkts.

Bedeutung erlangen diese Pflichten beispielsweise durch den Umstand, dass additive Fertigungsverfahren die nicht autorisierte Herstellung von Zubehörteilen erheblich erleichtert. Künftig könnten Produkthersteller daher häufig vor die aufwendige Aufgabe gestellt werden, einen hochgradig zersplitterten und kleinteiligen Markt nach fremdem Zubehörteilen abzusuchen, durch welche ihre Produkte erst zur Gefahr werden (Leupold/Glossner 2016, S. 266 ff.).

Wer steht haftungsrechtlich in der Verantwortung? 3.2

Beiden Haftungssystemen ist gemein, dass sie die Hersteller der Produkte in die Pflicht nehmen, wenn Nutzer oder Dritte durch fehlerhafte Produkte zu Schaden kommen. Bei klassischen arbeitsteiligen Produktionsprozessen mit mehreren Herstellern ist die Zuordnung der Haftungsverantwortlichkeiten nach Endhersteller und Zulieferer etabliert (Kasten).

Im Kontext der additiven Fertigung und allgemein einer digitalisierten Produktion gestaltet sich die Zuordnung der Haftungsverantwortlichkeiten nach Endhersteller und Zulieferer zunehmend komplizierter, weil die Fertigungsprozesse mitunter eine ausgeprägte Arbeitsteilung unter Beteiligung diverser Akteure aufweisen, die (Teil-)Produkte vermehrt virtuell bzw. in Form von Software vorliegen, die wesentliche Leistung innerhalb der Produktionskette durch die Konstrukteure erbracht wird, Produktnutzer in einen immer flexibleren

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Produktionsprozess eingebunden werden, die eigentliche physische Fertigung ausgelagert wird oder dezentral erfolgt etc. Dies kann zu komplexen Akteurskonstellationen führen, in denen die Bedeutung des Endherstellers innerhalb der Wertschöpfungskette generell schwindet und der Nachweis der haftungsbegründenden Kausalität zunehmend schwierig ist (VDI 2016, S. 38).

Haftungsverantwortung gemäß Produkt- und Produzentenhaftung

Bei der *Produkthaftung* gilt als Hersteller zunächst derjenige, der das »Endprodukt, einen Grundstoff oder ein Teilprodukt« hergestellt hat (§ 4 Nr. 1 S. 1 ProdHaftG). Dabei bezeichnet ein Endprodukt das für den Nutzer bestimmte fertige Erzeugnis, während Teilprodukte die für den Einbau bestimmten Zulieferprodukte darstellen (Leupold/Glossner 2016, S. 210). In der Praxis steht der Hersteller des Endprodukts (oft auch als Assembler bezeichnet) an erster Stelle in der haftungsrechtlichen Verantwortung, da von diesem erwartet werden kann, dass er in einer arbeitsteiligen Produktion den gesamten Herstellungsprozess organisiert und kontrolliert sowie das Wissen zur Gefahrenvermeidung seiner Zulieferer bündelt (Leupold/Glossner 2016, S. 210). Nimmt ein Geschädigter den Endhersteller in Anspruch, muss dieser, sofern die Kausalität zwischen Produktfehler und Schadenseintritt nachweisbar ist, vollen Schadensersatz leisten, auch wenn der Produktfehler einem Zulieferer angelastet werden kann. Der Endhersteller hat aber die Möglichkeit, die Zulieferer in Regress zu nehmen, um einen Ausgleich in Abhängigkeit der jeweiligen Verantwortungsteile zu suchen. Hierbei sind regelmäßig die zwischen Endhersteller und Zulieferer geschlossenen vertraglichen Haftungsabreden (z. B. im Rahmen von Qualitätssicherungsvereinbarungen) von Bedeutung (Leupold/Glossner 2016, S. 211 f. u. 234).

Zwar steht auch hinsichtlich der *Produzentenhaftung* der Endhersteller in der besonderen Verantwortung für die Fehlerfreiheit seiner Produkte, jedoch haftet er im Gegensatz zur Produkthaftung nicht grundsätzlich für die Fehler seiner Zulieferer (Leupold/Glossner 2016, S. 255). Voraussetzung für die Inanspruchnahme eines Zulieferers ist jedoch der Nachweis der Kausalität zwischen dem ihm zur Last gelegten Produktfehler und dem Schadenseintritt (VDI 2016, S. 38). Gleichwohl kann aber auch in diesem Fall dem Endhersteller unter Umständen eine haftungsbegründende Mitverantwortung angelastet werden, etwa dann, wenn er seine Zulieferer nicht sorgfältig ausgewählt und kontrolliert, Fehler im Zulieferprodukt übersehen oder die generelle Eignung des verwendeten Materials nicht überprüft hat (Leupold/Glossner 2016, S. 257).

Welche haftungsrechtlichen Fragestellungen dies im Kontext der additiven Fertigung aufwerfen kann, wird nachfolgend anhand einiger exemplarischer pra-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

xisrelevanter Akteurskonstellationen diskutiert; eine systematische Erörterung ist jedoch nicht möglich.

Akteurskonstellation: In einer Autowerkstatt werden Ersatzteile vor Ort additiv gefertigt. Die digitalen Fertigungsvorlagen und eine einfach zu bedienende additive Fertigungsanlage werden durch den Originalhersteller der Ersatzteile zur Verfügung gestellt. Durch ein solcherart gefertigtes Ersatzteil kommt es zu einem Autounfall.

Es ist die Frage zu klären, ob bzw. inwieweit der Bediener der additiven Fertigungsanlage in der Autowerkstatt als Hersteller im Sinne des Haftungsrechts zu qualifizieren ist und damit haftungsrechtlich in der Verantwortung für Produktfehler steht. Da digitale Fertigungsvorlagen sämtliche Konstruktions- und die wesentlichen Fabrikationsmerkmale beinhalten, könnte er sich auf die Position zurückziehen, dass er die Anlage letztlich nur bediene und somit auch keinen Einfluss auf die Sicherheit des zu fertigenden Produkts habe ausüben können.

Klärung bringt hier weder die Herstellerdefinition nach § 4 ProdHaftG noch die aktuelle Rechtsprechung. Weiterhelfen könnte hier der in den Publikationen des VDI vertretene Ansatz, nach welchem ein Hersteller nur derjenige sein könne, der eine auf das Produkt bezogene »eigenverantwortliche Tätigkeit« wahrnimmt (VDI 2014, S. 17). Hiervon abzugrenzen sei sodann die Qualifizierung als Lieferant, der keine relevante Tätigkeit in Bezug auf das Produkt ausübt und gemäß § 4 Abs. 3 ProdHaftG auch nur notfalls, d. h. wenn der Hersteller des Produkts nicht erkennbar ist, als Haftungsadressat in Anspruch genommen werden sollte (VDI 2016, S. 37).

Nach dieser Auffassung wäre die Zuordnung der Verantwortlichkeiten einfacher und nach den Gegebenheiten des Einzelfalls zu entscheiden: Wenn der Bediener einer additiven Fertigungsanlage lediglich eine fremdgeschaffene digitale Fertigungsvorlage auf die Anlage überspielt und den Fertigungsvorgang auslöst, ansonsten aber keinen weiteren Einfluss auf die Ausgestaltung und Durchführung des Fertigungsprozesses nimmt, kann seine haftungsrechtliche Verantwortung zumindest angezweifelt werden.

Akteurskonstellation: Ein Designbüro erstellt für ein neues Möbelstück ein 3-D-Modell, das es einem externen Dienstleister mit dem Auftrag zur additiven Fertigung auf einer professionellen Anlage überlässt. Der Käufer des Möbelstücks verletzt sich, als dieses unerwartet auseinanderbricht. Als Ursache werden Lufteinschlüsse im Bauteil ermittelt.

Bei professionellen additiven Fertigungsanlagen beschränkt sich der Betrieb nicht nur auf das Überspielen der Fertigungsvorlagen und Starten des Fertigungsvorgangs, vielmehr handelt es sich hierbei um wissensintensive und auf-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

wendige Prozesse, die eine Interaktion des Bedieners (z.B. in Bezug auf die Gewährleistung konstanter Prozessbedingungen) und je nach Verfahren manuelle Nacharbeiten erfordern. Auch muss das 3-D-Modell für die additive Fertigung noch aufbereitet und die Fertigungsvorlage erstellt werden (Kap. III.1). In dieser Situation nimmt der Anlagenbetreiber fraglos eine eigenverantwortliche Tätigkeiten wahr und übt Einfluss auf die Produktsicherheit aus, sodass er zumindest für Fabrikationsfehler in der haftungsrechtlichen Verantwortung steht (vgl. Leupold/Glossner 2016, S. 217).

Akteurskonstellation: Ein Triebwerkshersteller beauftragt ein Konstruktionsbüro mit der Erstellung eines 3-D-Modells für ein Bauteil, das auf den eigenen additiven Fertigungsanlagen hergestellt und in ein neues Triebwerk eingebaut werden soll. Da nur die äußere Form des Bauteils vorgegeben ist, gestaltet das Konstruktionsbüro zwecks Gewichtseinsparung das Innere wabenförmig. Durch einen strukturellen Mangel im Bauteil kommt es zu einem Flugzeugabsturz.

Ist die Kausalität zwischen dem Schadenseintritt und einem Konstruktionsfehler in der inneren Struktur des Bauteils gegeben, liegt die Verantwortung beim Ersteller des 3-D-Modells, welches die geometrische Gestalt des Werkstücks vollständig definiert. Ob dieser allerdings auch haftungsrechtlich in Anspruch genommen werden kann, hängt letztlich davon ab, ob digitale Vorlagen für die additive Fertigung als Produkte im Sinne des Haftungsrechts zu qualifizieren sind.

Für die *Produkthaftung* ist diese Frage mangels einer höchstrichterlichen Entscheidung allerdings noch ungeklärt. In der rechtswissenschaftlichen Diskussion wird dies überwiegend bejaht, da es letztlich auch mit Blick auf die gesetzliche Zielsetzung (Schutz des Nutzers vor fehlerhaften Produkten) keinen Unterschied machen dürfe, in welcher Form ein Teilprodukt zugeliefert werde (Leupold/Glossner 2016, S. 208; VDI 2014, S. 17); die definitive Klärung hat jedoch durch die Rechtsprechung zu erfolgen.

Für die *Produzentenhaftung* hingegen ist die Frage zu bejahen, da es hier laut Leupold und Glossner (2016, S. 254) auf die physische Verkörperung des Produkts nicht ankomme.

Akteurskonstellation: Ein Automobilausrüster soll für einen Kunden eine Sonderanfertigung für die Innenausstattung eines Luxuswagens additiv fertigen. Er bietet dem Kunden an, gemeinsam mit dem Produktdesigner das 3-D-Modell für das Bauteil am Computer zu entwickeln. Später kommt es durch das eingebaute Bauteil zu einem Autounfall.

Wenn in einer solchen Konstellation Konstruktionsmängel als Ursache für den Unfall in Betracht kommen, war der Geschädigte möglicherweise an der Entste-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

hung des ursächlichen Produktfehlers selber beteiligt. Dies könne laut VDI (2016, S. 38) im Wege des Mitverschuldens gemäß § 254 BGB berücksichtigt werden. Voraussetzung dafür wäre, dass der Geschädigte die Sorgfalt außer Acht gelassen hat, die ein verständiger Mensch im eigenen Interesse aufwendet, um sich vor Schaden zu bewahren. Welche Sorgfaltsanforderungen im Kontext der additiven Fertigung als vernünftig und allgemein üblich gelten dürfen, ist allerdings mangels gerichtlicher Entscheidungen bisher noch ungeklärt. Auch hier dürfte es derzeit nur die Möglichkeit der vertraglichen Regelungen geben (VDI 2016, S. 38).

Akteurskonstellation: Ein Auftragsfertiger bezieht seit Jahren die Ausgangsmaterialien beim Hersteller seiner additiven Fertigungsanlagen. Aus wirtschaftlichen Gründen wechselt er auf die Ausgangsmaterialien eines Drittanbieters. Kurz darauf erstickt eine Person, weil sich aus einer durch ihn gefertigten Zahnkrone plötzlich Teile gelöst haben. Der Auftragsfertiger macht dafür mangelhaftes Ausgangsmaterial verantwortlich.

Das ProdHaftG sieht ausdrücklich auch die Haftung für die Hersteller von Grundstoffen vor (§ 4 Abs. 1 ProdHaftG). Voraussetzung für eine Haftung des Materialherstellers ist allerdings, dass der Produktfehler auf einen Mangel im Ausgangsmaterial zurückgeführt werden kann. Bei fehlerhaftem Gebrauch des Materials haftet der Materialhersteller dagegen nicht. Allerdings steht er in der Pflicht, die Abnehmer seiner Ware vor vorhersehbaren versehentlichen Fehlgebräuchen zu warnen, da anderenfalls ein Instruktionsfehler geltend gemacht werden könnte (Kap. VI.3.1) (Leupold/Glossner 2016, S. 215 ff.).

Die im Einzelfall zu klärende Frage nach den Verantwortlichkeiten wird regelmäßig schwierig zu beantworten sein. Einerseits sind Materialmängel durchaus denkbar. Bei den Ausgangsmaterialien für die additive Fertigung handelt es sich vielfach um spezielle Werkstoffentwicklungen, die sich in der Praxis erst noch bewähren müssen, und fortlaufend werden neue Werkstoffe entwickelt. Auch werden die Ausgangsmaterialen zunehmend von Drittanbietern vertrieben, die im Gegensatz zu den Herstellern der Fertigungsanlagen die Werkstoffe nicht optimal auf die Verfahren abstimmen können (Leupold/Glossner 2016, S. 227). Andererseits bedingt die additive Fertigung eine sehr sorgfältige Auswahl bei den eingesetzten Ausgangsmaterialien in Abhängigkeit des verwendeten Verfahrens (und gegebenenfalls des eingesetzten Anlagentyps) sowie der gewünschten Eigenschaften des zu fertigenden Produkts (z.B. in Bezug auf seine Festigkeit und Bruchzähigkeit). Dabei stellt jeder Werkstoff wiederum spezielle Anforderungen an den Fertigungsprozess (z.B. in Bezug auf die Einhaltung besonderer Abkühlzeiten). Dass gelegentlich ungeeignete Materialien verwendet werden oder der Fertigungsablauf nicht optimal an die Materialerfordernisse

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

ausgerichtet wird, ist zu erwarten. Ob aber in diesem Fall der Materialhersteller den Anwender nicht ausreichend vor möglichen Fehlgebräuchen gewarnt hat, müssen gegebenenfalls Gerichte klären.

Akteurskonstellation: Ein Unternehmen wird aufgrund eines Schadens durch eines seiner Produkte mit einer Schadensersatzforderung konfrontiert. Während des Prozesses stellt sich schnell heraus, dass es sich um ein vom Original kaum unterscheidbares Produktplagiat handelt.

Der Hersteller des Originalprodukts haftet nicht, wenn Dritte durch widerrechtliche Nachahmungen seines Produkts zu Schaden kommen. Allerdings tragen sie als Originalhersteller die Beweislast, dass es sich beim fraglichen Produkt nicht um ihr Erzeugnis, sondern um eine Nachahmung handelt. Gelingt ihnen dieser Nachweis nicht, haften sie als Originalhersteller, was unter Umständen mit hohen Folgekosten für die Unternehmen verbunden ist (Gausemeier et al. 2012, S. 22).

Weil additive Fertigungsverfahren das Nachahmen von Produkten erleichtern, ist nicht nur mit einer Zunahme bei den Produktnachahmungen zu rechnen, sondern es könnten auch vermehrt solche in den Umlauf geraten, die sich äußerlich von Original kaum unterscheiden lassen. Im Schadensfall dürften Geschädigte ihre Ansprüche daher in erster Linie gegen den Originalhersteller geltend machen. Gleichzeitig ist anzunehmen, dass die Produktimitationen oft nur äußerlich dem Originalprodukt nachempfunden sind, ansonsten aber erhebliche qualitative und strukturelle Mängel aufweisen, z. B. weil minderwertige bzw. ungeeignete Ausgangsmaterialen verwendet oder zwecks Materialeinsparung im nicht sichtbaren Bereich Strukturelemente weggelassen oder Wanddicken verringert wurden. Insgesamt kann daher von einer Zunahme an Schadensfällen durch Produktimitationen ausgegangen werden, sodass sich Unternehmen künftig häufiger mit solchen Fallkonstellationen konfrontiert sehen könnten (Leupold/Glossner 2016, S. 202 u. 221 f.).

Haftungsrechtliche Verantwortung von Privatpersonen 3.3

Durch die zunehmende Verfügbarkeit von 3-D-Druckern im Heimbereich treten vermehrt auch Privatpersonen als Produkthersteller auf, sodass deren haftungsrechtliche Verantwortung für fehlerhafte Produkte zu klären ist.

Für das Produkthaftungsgesetz ist es unerheblich, ob ein Produkt durch ein Unternehmen oder eine Privatperson hergestellt wurde, vielmehr ist entscheidend, dass die Herstellung in kommerzieller Absicht erfolgte. Privatpersonen, die Produkte für den Verkauf oder eine andere Form des Vertriebs mit wirt-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

schaftlichem Zweck (Vermietung, Verpachtung etc.) additiv fertigen oder fertigen lassen, haften damit für fehlerhafte Produkte genauso nach dem ProdHaftG, wie dies Unternehmen tun (Leupold/Glossner 2016, S. 217 ff.).

Bei der Produzentenhaftung wird es mangels einer eindeutigen Regelung im BGB vom Einzelfall abhängen, inwieweit die Rechtsprechung auch Privatpersonen die Einhaltung der vorrangig an Unternehmen gerichteten Verkehrsregelungspflichten auferlegt. Tritt aber eine Privatperson wie ein Unternehmer in Erscheinung (z. B. wenn sie nebenberuflich einen Handel mit additiv gefertigten Ersatzteilen betreibt), wird sie laut Leupold/Glossner (2016, S. 255) jedenfalls auch nach der Produzentenhaftung für Produktfehler einstehen müssen.

Folgende exemplarische Akteurskonstellationen könnten im privaten Bereich von Praxisrelevanz sein.

Akteurskonstellation: Ein Konstrukteur, der beruflich neue Bauteile für die additive Fertigung entwickelt, betreibt als Nebenerwerb zu Hause einen 3-D-Drucker, mit dem er verschiedene Gegenstände nach eigenen Entwürfen fertigt und im Internet verkauft.

Weil der Ingenieur zwar als Privatperson, aber mit kommerziellen Absichten handelt, haftet er für Fehler seiner Produkte. Zwar wird er durch seine beruflichen Qualifikationen Fehler in der Konstruktion und Fabrikation vermeiden können. Allerdings steht er auch in der Pflicht, für die von ihm vertriebenen Produkte ordnungsgemäße Gebrauchsanweisungen zu verfassen, die ihn beispielsweise bei möglichen Fehlgebräuchen vor zivilrechtlichen Ansprüchen schützen können. Noch schwieriger dürfte es für ihn sein, die ihm durch die Produzentenhaftung obliegenden Beobachtungs- und Reaktionspflichten in hinreichendem Maße zu erfüllen (Kap. VI.3.1).

Akteurskonstellation: Von einer Internetplattform, auf der private Nutzer selber erstellte digitale Vorlagen zum Kauf anbieten, lädt sich eine Privatperson gegen ein Entgelt eine Fertigungsvorlage herunter. Damit fertigt sie auf dem eigenen 3-D-Drucker einen Gegenstand, durch welchen es infolge eines Konstruktionsfehlers zu einem Schadensfall kommt.

Privatpersonen, die selbsterstellte 3-D-Modelle bzw. Fertigungsvorlagen auf Internetplattformen zum Kauf anbieten, haften für die Fehlerfreiheit der Konstruktion. Im Schadensfall kann der Geschädigte gegen den privaten Ersteller der Fertigungsvorlage Schadensersatzansprüche geltend machen.

Schon heute existieren zahlreiche Internetplattformen mit einer kaum zu überblickenden Vielfalt digitaler Vorlagen für Gegenstände, die auf dem heimischen 3-D-Drucker gefertigt werden können (Kap. II.2.). Es ist davon auszugehen, dass solche Vorlagen zum Teil auch von Laien mit unzureichenden

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

konstruktionstechnischen Kenntnissen erstellt werden. Diese Personen dürften zumindest bei komplexen Objekten regelmäßig nicht in der Lage sein, die Ordnungsgemäßheit der Konstruktion nach den anerkannten Regeln der Technik (bzw. nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik) zu gewährleisten. Dadurch setzen sie nicht nur die Produktnutzer einer potenziellen Gefahr aus, sondern auch sich selber einem hohen Haftungsrisiko.

Zwar muss der einzuhaltende Sicherheitsstandard dem Ersteller der Vorlagen auch zumutbar sein. Außerdem sind die Sicherheitsanforderungen an Gegenstände, wie sie aktuell typischerweise von Privatpersonen entworfen werden (Dekorationselemente, Spielfiguren, Schmuckstücke etc.), nicht mit jenen an industrielle Güter gleichzusetzen (z.B. Flugzeugbauteile) (Leupold/Glossner 2016, S. 261). Ob sich allerdings alleine aus dem Umstand, dass ein Produkt durch eine Privatperson und nicht durch ein Unternehmen hergestellt wird, Haftungsprivilegien herleiten lassen (z.B. weil Privatpersonen der Zugang zum notwendigen Wissen verwehrt ist), ist anzuzweifeln.

Akteurskonstellation: Weil Anbieter von digitalen Vorlagen auf Internetplattformen typischerweise ein Pseudonym verwenden, kann der Geschädigte den Ersteller der fehlerbehafteten digitalen Vorlage nicht ermitteln.

In diesem Fall wäre die Rolle des Betreibers der Internetplattformen, über welche die Vorlage bezogen wurde, zu diskutieren. Dieser könnte gegebenenfalls im Wege der Lieferantenhaftung gemäß § 4 Abs. 3 ProdHaftG in die Verantwortung gezogen und somit aufgefordert werden, binnen einer Frist von einem Monat die Identität des Erstellers zu benennen. Kann oder will der Betreiber dieser Aufforderung nicht nachkommen, muss er als Lieferant der digitalen Vorlage für den vollen Schaden aufkommen (Leupold/Glossner 2016, S. 220 f.).

Akteurskonstellation: Auf einer Internetplattform findet eine Privatperson eine kostenlose digitale Fertigungsvorlage, mit welcher sie auf dem eigenen 3-D-Drucker einen Gegenstand fertigt. Infolge eines Konstruktionsmangels kommt es zu einem Schadensfall.

Wenn Vorlagen kostenlos zum Download angeboten werden, was aufgrund der im Umfeld des 3-D-Drucks besonders aktiven Maker- bzw. Open-Source-Bewegung oft vorkommt (Kap. II.2), ist eine Haftung durch den Ersteller der Vorlagen nach der Produkthaftung und wohl auch nach der Produzentenhaftung ausgeschlossen. Gegebenenfalls könnte es sich hier um eine Schenkung gemäß § 516 BGB handeln. In diesem Fall hätte der Ersteller der Vorlage, sofern dieser dann auch ermittelt werden kann, nach § 521 BGB nur Vorsatz (wovon im vorliegenden Kontext nicht auszugehen ist) oder grobe Fahrlässigkeit (Verletzung der Sorgfaltspflichten in ungewöhnlich hohem Maß) zu verantworten. Die dies-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

bezüglich im Kontext der additiven Fertigung konkret anzulegenden Sorgfaltsanforderungen wären durch die Rechtsprechung erst noch zu konkretisieren.

Akteurskonstellation: Für seine Wohnung fertigt eine Privatperson nach eigenen Entwürfen verschiedene Dekorationsgegenstände auf dem privaten 3-D-Drucker. Durch einen dieser Gegenstände verletzt er sich schwer.

Ob Gerichte in dieser Situation eine Verantwortung durch den Hersteller des 3-D-Druckers oder der Ausgangsmaterialen gelten lassen würden, beispielsweise weil diese den Nutzer nur unzureichend über mögliche Risiken bei der Verwendung des 3-D-Druckers oder der Materialien informiert haben, kann derzeit mangels konkreter Fallbeispiele nicht beurteilt werden, wäre aber wohl von den Gegebenheiten des Einzelfalls abhängig.

Zwischenfazit 3.4

In Bezug auf Haftungsfragen ist zurzeit eine in vielen Punkten noch unklare Rechtslage zu konstatieren. Weil erst seit wenigen Jahren auch Endprodukte mit additiven Fertigungsverfahren hergestellt werden, wurden hierzu noch keine Fälle vor Gericht verhandelt (Zitat Ensthaler in Gersemann 2015, S. 20). Insofern muss sich die Rechtsprechung erst noch entwickeln und durch konkrete Gerichtsentscheidung für Rechtsklarheit sorgen. Zumindest aus heutiger Sicht kann vermutet werden, dass das bestehende deutsche Haftungsrecht über das erforderliche Instrumentarium verfügt, um sich abzeichnende haftungsrechtliche Problemstellungen auch im Kontext der additiven Fertigung anzugehen.

Gleichwohl dürften einige Problemstellungen die Gerichte vor Herausforderungen stellen, sodass Experten gerade bei den ersten Streitfällen eine uneinheitliche Rechtsprechung erwarten (Gersemann 2015, S. 21). Schwierigkeiten bereitet insbesondere die Ermittlung der an der Schadensherbeiführung beteiligten Hersteller, also die korrekte Zuordnung der haftungsrechtlichen Verantwortlichkeiten. Laut VDI (2016, S. 38) könnten hier gegebenenfalls die zwischen Endhersteller und Zulieferer getroffenen vertraglichen Haftungsabreden neue Bedeutung erlangen, die von der Rechtsprechung bisher nicht, in Zukunft aber möglicherweise gebilligt werden könnten. Darüber hinaus könnte der in der US-amerikanischen Rechtsprechung entwickelte Ansatz der Marktanteilshaftung Abhilfe schaffen, bei welchem die verschiedenen Hersteller nicht als Gesamtschuldner, sondern entsprechend ihres Markterfolgs für fehlerhafte Produkte haften und damit letztlich als eine Risikogemeinschaft betrachtet werden. Ob sich Risikogemeinschaften perspektivisch auch im europäischen bzw. deutschen Recht etablieren können, bleibt aber abzuwarten (VDI 2016, S. 38).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Privatpersonen, die digitale Vorlagen für die additive Fertigung oder selbstgefertigte Gegenstände zum Kauf anbieten, müssen sich darüber im Klaren sein, dass sie genauso wie Unternehmen für die Fehlerfreiheit ihrer Erzeugnisse einzustehen haben. Es ist allerdings davon auszugehen, dass private Akteure nur unzureichend mit den geltenden Vorschriften vertraut und oft auch gar nicht in der Lage sind, die ihnen obliegenden Pflichten regelkonform einzuhalten. Dadurch setzen sie nicht nur die Produktnutzer einer potenziellen Gefahr, sondern darüber hinaus auch sich selber einem hohen Haftungsrisiko aus. Je nach Entwicklung des Angebots könnte es perspektivisch notwendig werden, den Verbraucherschutz im Hinblick auf digitale Vorlagen und Produkte aus privater Herstellung zu stärken (vgl. auch Bundesregierung 2013b, S. 9). Dies könnte beispielsweise dadurch erfolgen, dass für gefahrengeneigte Erzeugnisse aus privater Herstellung eine CE-Kennzeichnungspflicht verankert würde, wodurch diese vor Inverkehrbringen einer Konformitätsprüfung zu unterziehen wären.

4. Waffenherstellung mit additiven Fertigungsverfahren

Regelmäßig werden Befürchtungen geäußert, dass additive Fertigungsverfahren auch zur Herstellung von Waffen missbraucht werden könnten (Kap. V.3.3).

Gemäß §§ 2 u. 4 Waffengesetz (WaffG)[103] bedarf der Umgang mit Waffen grundsätzlich einer Erlaubnis, die an Bedingungen geknüpft ist (Mindestalter 18 Jahre, Bedürfnisnachweis, Nachweis der erforderlichen Sachkunde, Zuverlässigkeit und Eignung des Antragstellers etc.). Wie bzw. aus welchem Material eine Waffe hergestellt wird, ist waffenrechtlich nicht von Belang. Damit stellt nach übereinstimmender Ansicht die Herstellung einer einsatzfähigen Waffe mithilfe additiver Fertigungsverfahren eine gewerbsmäßige Waffenherstellung nach § 21 WaffG bzw. – wenn sie im privaten Bereich herstellt wird – eine nichtgewerbsmäßige Waffenherstellung nach § 26 WaffG dar, für die jeweils eine Waffenherstellungserlaubnis erforderlich ist (Bundesregierung 2013b, S. 11 f.; VDI 2016, S. 40). Dies gilt genauso, wenn wesentliche Teile einer Waffe additiv gefertigt werden bzw. eine Waffe aus solchen Teilen zusammengebaut wird[104] (VDI 2016, S. 40). Ein Verstoß stellt eine Straftat dar und kann im gewerblichen Bereich mit einer Freiheitsstrafe von 6 Monaten bis 5 Jahre, im pri-

103 Waffengesetz vom 11. Oktober 2002 (BGBl. I S. 3970, 4592; 2003 I S. 1957), das zuletzt durch Artikel 288 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist

104 Der Begriff des Herstellens umfasst gemäß Punkt 21.2 der allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Waffengesetz (WaffVwV) auch das »Anfertigen wesentlicher Teile von Schusswaffen … und das Zusammensetzen fertiger Teile zu einer Schusswaffe« (VDI 2016, S. 40).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

vaten Bereich mit einer Geldstrafe oder Freiheitsstrafe bis zu 3 Jahren bestraft werden (§ 52 Abs. 1 u. 3 WaffG).

Wird eine Waffe mithilfe eines Auftragsfertigers oder in einem FabLab hergestellt, trifft den Auftragsfertiger bzw. den FabLab-Betreiber in der Regel keine strafrechtliche Verantwortlichkeit, da ihm der Vorsatz für ein strafbares Handeln fehlt (Leupold/Glossner 2016, S. 782). Es bestehen jedoch Möglichkeiten, im Rahmen des Polizei- und Ordnungsrechts gefahrenrechtlich gegen ihn vorzugehen. Wenn z.B. ein Betreiber eines FabLabs Anlass zur Besorgnis gibt, durch »aktives Wegsehen« der illegalen Waffenherstellung Vorschub zu leisten, könnte dies Anlass für eine Gewerbeuntersagung wegen Unzuverlässigkeit gemäß § 35 Gewerbeordnung sein. In jedem Fall aber können bereits erstellte Waffenteile beschlagnahmt werden (Ferner 2014).

Zu klären bleibt schließlich, ob bzw. wie gegen die Erstellung und Verbreitung von 3-D-Modellen bzw. Fertigungsvorlagen von Waffen(teilen) rechtlich vorgegangen werden kann. Hiervon dürfte das größte Gefahrenpotenzial ausgehen, denn erst im Internet frei verfügbare Vorlagen versetzen Personen mit kriminellen Absichten in die Lage, vergleichsweise einfach und ohne spezielle Fachkenntnisse illegal Waffen herzustellen, was ihnen infolge des aufwendigen konventionellen Fertigungsprozesses bislang nur beschränkt möglich war. Waffenrechtlich ist die Erstellung und Verbreitung von 3-D-Modellen und Fertigungsvorlagen für die Herstellung von Waffen nicht strafbar (Bundesregierung 2013b, S. 12). So regelt § 40 Abs. 1 WaffG zwar, dass das Verbot des Umgangs auch das Verbot umfasst, zur Herstellung anzuleiten oder aufzufordern, allerdings bezieht sich dies ausdrücklich nur auf Gegenstände, mit denen Brände oder Explosionen ausgelöst werden können. Auch dürfte eine Beihilfe zur unerlaubten Waffenherstellung mangels Vorsatz auszuschließen sein (Ferner 2014).

Insofern verbleiben die Möglichkeiten, im Rahmen des Gefahrenabwehrrechts gegen den Ersteller der Baupläne vorzugehen, etwa indem die Löschung seiner Baupläne im Internet unter Androhung eines Zwangsgeldes bei Zuwiderhandlung angeordnet wird. Für den Fall, dass der Ersteller nicht bekannt ist, könnte sich eine solche Anordnung gegebenenfalls auch an den Betreiber der Internetplattform richten, auf der die Vorlage gespeichert ist, da das Gefahrenrecht auch die Inanspruchnahme unbeteiligter Dritter vorsieht, wenn die Gefahr nicht anders beseitigt werden kann (Ferner 2014). Ob bzw. wie allerdings im konkreten Fall die Polizei- und Ordnungsbehörden vorgehen würden, kann hier mangels konkreter Beispiele nicht antizipiert werden.

Zu konstatieren ist insgesamt, dass das Waffenrecht zwar den Tatbestand der konkreten Waffenherstellung abdeckt, nicht aber die Erstellung und Verbreitung entsprechender Vorlagen. Durch eine Ergänzung des § 40 Abs. 1 WaffG um weitere Waffenarten wäre es gegebenenfalls möglich, auch die Erstellung und Verbreitung entsprechender Vorlagen in den Anwendungsbereich des

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

WaffG aufzunehmen und so in Deutschland unter Erlaubnisvorbehalt zu stellen. Allerdings verbliebe immer noch die Möglichkeit, die entsprechenden digitalen Vorlagen von ausländischen Internetplattformen zu beziehen. Diskutiert wird daher der Vorschlag, die Hersteller von additiven Fertigungsanlagen und der erforderlichen Software (u.a. CAD-Programme) zu verpflichten, eine Filtersoftware in ihre Produkte zu implementieren, welche die Herstellung waffenähnlicher Bauteile verhindern soll (VDI 2016, S. 40; Kap. V.3.2).

Fazit 5.

Die Besonderheiten der additiven Fertigung (hochgradig virtuelle Fertigungskette, individualisierte Produkte, Anwendbarkeit durch Privatpersonen etc.) werfen eine Reihe von rechtlichen Fragestellungen und Problemlagen auf. In Bezug auf den Schutz des geistigen Eigentums gibt es noch zahlreiche ungeklärte Fragen hinsichtlich der Schutzfähigkeit von digitalen Vorlagen für die additive Fertigung wie auch in Bezug auf den Schutz bestehender Produkte vor Nachahmung mithilfe additiver Fertigungsverfahren. Auch ist noch offen, wie im Kontext einer individualisierten Produktion die Herstellerpflichten bezüglich der Produktsicherheit eingehalten werden können, da gängige Methoden der Qualitätssicherung nicht oder nur schwer anzuwenden sind. In haftungsrechtlichen Streitfällen dürfte vor allem die Frage nach den haftungsverantwortlichen Produktherstellern häufig Schwierigkeiten bereiten, da aufgrund der regelmäßig vielen Beteiligten an dem in weiten Teilen virtuellen Produktentstehungsprozess komplexe Akteurskonstellationen typisch sind.

Festzuhalten bleibt somit eine in vielen Punkten noch unklare Rechtslage, die vielfältigen Klärungsbedarf nach sich zieht. Zurückzuführen ist dies aber weniger auf bestehende Gesetzeslücken als vielmehr auf den Umstand, dass sich infolge der noch jungen Technologie bisher eine konsolidierte Rechtsprechung zur additiven Fertigung gar nicht entwickeln konnte, weil zu vielen Einzelfragen bisher keine Gerichtsentscheidungen ergangen sind. So sind der aktuellen rechtswissenschaftlichen Diskussion keine Anhaltspunkte zu entnehmen, die einen aus heutiger Sicht dringenden gesetzgeberischen Regelungsbedarf erkennen lassen. Zu betonen ist allerdings, dass die juristische Befassung mit dem Thema erst im Entstehen begriffen ist. Insofern ist nicht auszuschließen, dass sich gegebenenfalls vorhandene Regelungslücken erst dann manifestieren, wenn die ersten schwierigen Streitfälle vor Gericht verhandelt werden.

Herausforderungen in Bezug auf die Durchsetzung bestehender Regelungen im Kontext der additiven Fertigung ergeben sich insbesondere durch die zunehmende Verfügbarkeit von erschwinglichen additiven Fertigungsanlagen im gewerblichen und privaten Bereich, die neuen Akteuren einen vergleichsweise

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

niedrigschwelligen Einstieg in eine eigene Produktion bieten. Nicht nur könnte sich dadurch das Problem der Produktpiraterie verschärfen, weil additive Fertigungsverfahren das Nachahmen von Produkten erleichtern. Auch dürften viele dieser neuen Akteure und insbesondere Privatpersonen regelmäßig nur unzureichend mit den geltenden Vorschriften zur Produktsicherheit und -haftung vertraut bzw. oft auch gar nicht in der Lage sein, die ihnen obliegenden Pflichten regelkonform einzuhalten. Dies dürfte z.B. Marktüberwachungsbehörden, die die Einhaltung der vom Gesetzgeber festgelegten Anforderungen an die Produktsicherheit überwachen, vor Herausforderungen stellen. Inwieweit sich dies zu einem Risiko für die Verbraucher entwickelt und ob es perspektivisch gegebenenfalls notwendig wird, den Verbraucherschutz hinsichtlich solcher Produkte zu stärken, bleibt abzuwarten und ist von der weiteren Entwicklung abhängig.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Resümee und Handlungsfelder VII.

Wie kaum eine andere Fertigungstechnologie übt die additive Fertigung in der Öffentlichkeit und den Medien eine enorme Faszination aus. Entsprechend vielfältig sind die Meinungen und Vorstellungen über das Leistungsvermögen der Verfahren, ihre Anwendungspotenziale und -szenarien sowie über ihre Auswirkungen und Folgen auf unser Leben. Das wichtigste Ziel des vorliegenden TAB-Berichts ist es daher, anhand einer systematischen und wissenschaftlich fundierten Darstellung und Bewertung der Entwicklungen in diesem Feld eine Orientierung zu bieten, um einerseits eine realistische Einschätzung der Potenziale zu liefern und Wege aufzuzeigen, wie sie gegebenenfalls besser genutzt werden können, und um andererseits einen differenzierten Blick auf mögliche gesellschaftliche und ökologische Auswirkungen dieser Technologie zu erlauben.

Im Folgenden werden die aus der politischen Perspektive wichtigsten Erkenntnisse aus dem TAB-Projekt resümiert, wofür zwischen der industriellen additiven Fertigung und dem privaten 3-D-Druck differenziert wird.

Additive Fertigungsverfahren in der Industrie 1.

Als Fertigungstechnologien zur Herstellung von Prototypen oder Modellen (Rapid Prototyping) und Werkzeugen oder Formen für die konventionelle Produktion (Rapid Tooling) haben additive Fertigungsverfahren einen hohen technischen Reifegrad erreicht und sind in der industriellen Anwendung weitgehend etabliert.

Die Erschließung der Anwendungspotenziale der additiven Fertigung für die Herstellung von Endprodukten (Rapid Manufacturing) hingegen steht noch am Anfang. Die Erwartungen sind sehr hoch: Additive Fertigungsverfahren erlauben die Herstellung geometrisch hochkomplexer Bauteile, die mit konventionellen Verfahren nicht oder nur sehr aufwendig realisierbar wären (z.B. Leichtbaukonstruktionen). In der Serienproduktion eröffnen sie neue Optionen für die Produktindividualisierung. Weitere ökonomische und ökologische Vorteile additiver Produktionsprozesse ergeben sich gegebenenfalls in der Gesamtbetrachtung unter Berücksichtigung des Ressourceneinsatzes (Material, Energie, Personal) in Produktion und Logistik sowie neuer Geschäftsmodelle, die durch eine weitgehend virtuelle additive Prozesskette ermöglicht werden (z.B. in der Ersatzteilproduktion). Für die großvolumige Produktion baugleicher Produkte für den Massenmarkt eignen sich additive Fertigungsverfahren hingegen nicht, da konventionelle Methoden wirtschaftlicher sind.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Zurzeit beschränkt sich der Einsatz von additiven Fertigungsverfahren in der Produktion vorrangig auf die Herstellung von komplexen Bauteilen als Einzelstücke oder Kleinserien in bestimmten Branchen. In Deutschland sind dies vor allem die Luft- und Raumfahrtindustrie (Herstellung von Leichtbauteilen), die Automobilindustrie (Spezialanfertigungen) und die Medizintechnik (Zahnersatz, Ohrpassstücke für Hörgeräte, individuelle Implantate). Einem Routineeinsatz in der industriellen Produktion insbesondere auch in größeren Serien stehen derzeit noch diverse technische Limitationen im Wege. Zentrale Herausforderungen bestehen in der Beschleunigung der additiven Fertigungsprozesse (vor allem bei größeren Bauteilabmessungen), der Automatisierung vor- und nachgelagerter Prozessschritte sowie in der Qualitätssicherung.

Der weltweit starke Anstieg bei wissenschaftlichen Publikationen und Patentanmeldungen in diesem Bereich zeigt deutlich, dass an der Überwindung der technischen Limitationen intensiv gearbeitet wird. Wird eine ähnliche Entwicklung wie beim additiven Prototypen- und Werkzeugbau unterstellt, kann für die additive Fertigung von Endprodukten erwartet werden, dass es innerhalb der nächsten 10 bis 20 Jahre zu einer Ausreifung der technischen Entwicklungen und Anwendungen kommt.

Angesichts der potenziellen Bedeutung der additiven Fertigung für die internationale Wettbewerbsfähigkeit und Innovationskraft des produzierenden Gewerbes in Deutschland sollten deutsche Akteure die Entwicklungen in diesem Feld maßgeblich mitprägen, sowohl was die technologische Weiterentwicklung der additiven Fertigung als auch die Erschließung ihrer Anwendungspotenziale in der industriellen Produktion angeht. Akteure aus Wissenschaft und Wirtschaft, aber gleichermaßen auch Intermediäre (Verbände, Kammern) sowie die öffentliche Hand und die Politik sind hier gefordert. Gestaltungsfelder und akteursspezifische Maßnahmen wurden ausführlich in Kapitel IV.3 dargestellt. Nachfolgend werden die aus politischer Perspektive wichtigsten Handlungsfelder resümiert.

Technologien weiterentwickeln 1.1

Im Bereich der Forschung und Entwicklung ist Deutschland im internationalen Vergleich gut aufgestellt, was im Besonderen für metallbasierte additive Fertigungsverfahren zutrifft. Der deutsche Anteil ist bei den wissenschaftlichen Publikationen, vor allem aber bei den Patenten stark und stabil. Unter den führenden Patentanmeldern befinden sich zahlreiche deutsche Akteure sowohl aus der Forschung als auch aus der Industrie, und einige der weltweit führenden kommerziellen Anbieter von additiven Fertigungsverfahren und -anlagen sind hierzulande beheimatet.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Zentraler Akteur in der Forschung und Entwicklung sind die USA, wo kunststoffbasierte Verfahren stärker im Fokus stehen. China zeigt gemessen an der Zahl der Publikationen die mit Abstand größte Dynamik und steuert nach den USA mittlerweile den zweitgrößten Anteil des weltweiten Outputs bei. Die Regierungen beider Länder gehen die Förderung der additiven Fertigung strategisch an und investieren seit rund 5 Jahren beträchtliche Mittel in entsprechende Forschungs- und Entwicklungsvorhaben. Weitere Länder haben in den letzten Jahren große staatliche Förderprogramme für die additive Fertigung aufgelegt, u.a. Großbritannien, Japan und Singapur.

Gemessen am Volumen der staatlichen Fördermittel ist Deutschland im internationalen Vergleich gut aufgestellt. Dennoch sollten die sich intensivierenden Entwicklungsanstrengungen im Ausland Anlass geben zu überprüfen, ob die forschungs- und innovationspolitischen Maßnahmen in Deutschland über die bisherigen Aktivitäten hinaus verstärkt bzw. fokussiert werden könnten. Die seit 2015 deutliche Intensivierung der Projektförderung durch das BMBF und das BMWi ist ein wesentlicher Schritt in diese Richtung.

Eine über die bloße Erhöhung der Fördermittel hinausgehende Maßnahme wäre die Entwicklung einer ressortübergreifenden Strategie zur additiven Fertigung, durch welche sich gegebenenfalls vorhandene Synergiepotenziale nutzen und längerfristige innovationspolitische Ziele besser erschließen ließen. Ein Ansatz hierfür wäre eine stärkere strategische Einbettung der additiven Fertigung in die Forschungs- und Innovationspolitik der Hightech-Strategie. Dies könnte gleichzeitig dazu dienen, die additive Fertigung stärker mit der politisch stark priorisierten Industrie-4.0-Thematik zu verzahnen: Zwischen beiden Technologiefeldern bestehen enge Verbindungen und Synergien (z.B. Digitalisierung von Prozessketten, individualisierte Produktion, neue Geschäftsmodelle im Ersatzteil- und Servicebereich), welche hierzulande und im Gegensatz zur Situation in anderen Ländern bislang kaum zum Tragen kommen bzw. genutzt werden.

Um mit den eingesetzten Mitteln einen möglichst großen Impuls zur Diffusion additiver Fertigungsverfahren in die industrielle Praxis zu generieren, wäre eine Möglichkeit, die Technologieförderung in Deutschland stärker auf einige, für industrielle Serienanwendungen besonders relevante Kernverfahren zu konzentrieren, anstatt die bestehende Vielfalt der Verfahren in der Breite zu fördern.

Anwenderseitige Diffusion stärken 1.2

In deutlicher Diskrepanz zu Deutschlands starker Position in der Forschung und Entwicklung von additiven Fertigungsverfahren und -anlagen lässt sich eine augenfällige Schwäche auf der Anwenderseite konstatieren. Die anwenderseitige Diffusion der Verfahren in die industrielle Praxis erfolgte hierzulande

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

bisher nur in sehr engen Grenzen und auf einige wenige Branchen fokussiert. Demgegenüber ist in den USA die Anwenderseite erheblich breiter aufgestellt.

Hier erweist sich Deutschlands Technologieführerschaft bei den konventionellen Fertigungsverfahren als ambivalent: Wo andere Länder mithilfe der additiven Fertigung gerade erst die Fähigkeiten entwickeln, bestimmte komplexe Bauteile herzustellen, produzieren deutsche Unternehmen entsprechende Erzeugnisse teilweise schon seit Jahren mit ihren technisch hochentwickelten konventionellen Methoden. Angesichts der rasch voranschreitenden technischen Entwicklungen kann dies dazu führen, dass aufkommende, unter Umständen disruptive Anwendungs- und Innovationspotenziale der additiven Fertigung hierzulande nicht bzw. zu spät erkannt und erschlossen werden, was sich nachteilig auf die internationale Wettbewerbsfähigkeit des deutschen verarbeitenden Gewerbes auswirken könnte. Trotz (oder gerade wegen) Deutschlands Stärken in der konventionellen Fertigung sollte daher ein besonderes Augenmerk auf die stärkere Diffusion von additiven Fertigungsverfahren in die industrielle Praxis gelegt werden.

Bewusstsein für die Potenziale der additiven Fertigung erhöhen

Die Bekanntheit der additiven Fertigung ist in der deutschen Industrie insbesondere im Hinblick auf konkrete Anwendungspotenziale bisher nur schwach ausgeprägt. Dies trifft namentlich auf KMU zu, obwohl diese in vielen Bereichen technologische Vorreiter sind.

Eine generelle Option zur Steigerung der Bekanntheit der additiven Fertigung wäre, die öffentliche Sichtbarkeit der entsprechenden Förderaktivitäten des Bundes zu verstärken, ähnlich wie dies gegenwärtig für den Themenkomplex Industrie 4.0/Digitalisierung stattfindet. Deutsche Unternehmens- und Verbandsvertreter verweisen in diesem Zusammenhang regelmäßig auf die Situation in den USA, wo die additive Fertigung durch das öffentlichkeitswirksame America-Makes-Programm der Regierung weithin bekannt sei und infolgedessen auch deren Anwendungspotenziale besser erkannt und erschlossen würden. Auch vor diesem Hintergrund könnte eine stärkere strategische Einbettung der Förderung der additiven Fertigung in die Forschungs- und Innovationspolitik der Hightech-Strategie von Vorteil sein.

Ein Ansatzpunkt für die Forschungsförderung zur Stärkung der anwenderseitigen Diffusion und Stimulierung der Entwicklung bedarfsorientierter Lösungen ist die gezielte Einbindung möglichst vieler unterschiedlicher Anwender(gruppen) in technologische Entwicklungsprojekte. In Verbundprojekten kann durch die Integration aller Wertschöpfungspartner der Wissenstransfer an vor- und nachgelagerte Wertschöpfungspartner begünstigt werden, was zwar vielfach schon umgesetzt wird, aber konsequent ausgebaut werden sollte.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Ein in Bezug auf das nur schwach ausgeprägte Bewusstsein für die Chancen und Potenziale der additiven Fertigung im produzierenden Gewerbe in Deutschland erschwerender Faktor ist, dass es in den Rahmenlehrplänen und Ausbildungsordnungen zahlreicher Berufe mit Anknüpfungspunkten zur additiven Fertigung an entsprechenden Lehrinhalten noch fehlt. Auch was die Ingenieurausbildung an Hochschulen angeht, sind die Lehrangebote zur additiven Fertigung noch rar und bezüglich des Inhalts und des Umfangs sehr heterogen. Um die in vielen Branchen relativ unbekannte Fertigungstechnologie überhaupt erst bzw. stärker ins Bewusstsein von Fachkräften, Ingenieuren und potenziellen Produktnutzern zu bringen, sollte eine stärkere Verankerung der additiven Fertigung in die Berufsaus- und -fortbildung sowie die Hochschulbildung von allen beteiligten Akteuren (Politik/Behörden, Hochschulen, Industrie, Verbände, Kammern etc.) angegangen werden. Genauso wichtig ist dies für die Fachkräftesicherung: An qualifizierten Facharbeitern und Ingenieuren für die additive Fertigung mangelt es bereits heute und angesichts der erwarteten rasanten Marktentwicklung in den nächsten Jahren dürfte die benötigte Zahl sich noch stark erhöhen.

Nichttechnische Hemmnisse und Barrieren abbauen

Strategien zur Förderung der Diffusion additiver Fertigungsverfahren sollten verstärkt auf den Abbau vorhandener nichttechnischer Hemmnisse und Barrieren abzielen. Da in den Bereichen mit den gegenwärtig größten Anwendungspotenzialen (komplexe Bauteile als Einzelstücke oder Kleinserien) in Deutschland vorwiegend KMU zu finden sind, sollten diese primär in den Blick genommen werden. Wegen der begrenzten Personal- und Finanzressourcen stellt die Einführung von additiven Fertigungsverfahren gerade diese Unternehmen oft vor große Herausforderungen:

- *Hohe Risiken und Unsicherheiten bei Investitionen in additive Fertigungsverfahren*: Es steht eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren zur Auswahl, die für viele Einsatzzwecke technisch oft noch unausgereift sind und für die Technologiestandards und Normen noch fehlen.
- *Fehlende Informationen und Möglichkeiten zur Praxiserprobung*: KMU haben oft Schwierigkeiten bei der Identifikation von Anwendungspotenzialen, neuen Geschäftsmodellen und der passgenauen Einstiegstechnologie.
- *Unzureichende Qualifizierungsmöglichkeiten*: Die für den Einsatz erforderlichen Kompetenzen und Qualifikationen sind vor allem in KMU häufig nicht vorhanden und müssen aufwendig aufgebaut werden.

Mögliche Maßnahmen (z.B. Ausbau des Qualifizierungsangebots, Beratungsangebote, Pilotlinien, Förderung nichttechnischer Innovationen etc.) und Umsetzungsvorschläge zum Abbau nichttechnischer Hemmnisse und Barrieren sind in den Kapiteln IV.3.2 und IV.3.4 konkretisiert.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Gegebenenfalls vorhandene Regelungslücken schließen

Ein weiterer Faktor für die Zurückhaltung deutscher Unternehmer bei der Anwendung additiver Fertigungsverfahren bzw. daraus entstehender Produkte könnten rechtliche Unsicherheiten sein, die derzeit in den Bereichen Schutz des geistigen Eigentums, Gewährleistung und Produkthaftung existieren. Die teilweise noch unklare Rechtslage ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass sich infolge der noch jungen Technologie bisher noch keine konsolidierte Rechtsprechung speziell zur additiven Fertigung entwickeln konnte. Nach vorherrschender Meinung reichen die bestehenden Normen aus, um im Wege der Auslegung für Rechtsklarheit zu sorgen. Aus heutiger Sicht ist somit kein akuter gesetzgeberischer Handlungs- bzw. Regelungsbedarf zu konstatieren.

Nicht auszuschließen ist jedoch, dass sich gegebenenfalls vorhandene Regelungslücken erst dann identifizieren lassen, wenn die ersten komplexeren Streitfälle vor Gericht verhandelt werden. Die weitere Entwicklung der Rechtsprechung im Kontext der additiven Fertigung sollte daher aufmerksam beobachtet werden.

Schaffung von Standards und Normen

Die Entwicklung von Normen und Standards für die additive Fertigung (Prozessstandards, Qualitätsstandards, Leistungsspezifikationen von Verfahren etc.) ist gleichermaßen Voraussetzung für technologische Weiterentwicklungen, die Qualitätssicherung, die Verbesserung des Informationsangebotes für (potenzielle) Anwender, für die stärkere Verankerung von Lehrinhalten in der Aus- und Weiterbildung sowie für die Klärung rechtlicher Fragestellung (z.B. Haftungsfragen) – und somit insgesamt von zentraler Bedeutung für die weitere industrielle Verbreitung der additiven Fertigung. Die Bemühungen zur Schaffung von Normen und Standards bzw. die hier relevanten Akteure (in Deutschland VDI, VDE, DIN und Fachverbände, international u.a. ISO) sollten daher unterstützt werden.

Folgenforschung stärken 1.3

Ausgehend vom aktuell noch frühen Entwicklungsstadium von additiven Fertigungsverfahren zur Herstellung von Endprodukten dominieren technologische Entwicklungsziele die laufenden nationalen und internationalen Forschungsanstrengungen. Eine wirtschafts- und gesellschaftswissenschaftliche Forschung, die den Blick auf mögliche mittel- bis langfristige wirtschaftliche, ökologische und soziale Auswirkungen und Folgen der additiven Fertigung richtet, ist erst im Entstehen begriffen.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Angesichts der enormen Dynamik, die sowohl bei der technischen Entwicklung als auch bei der Diffusion in die Industrie absehbar ist, sollte die wirtschafts- und sozialwissenschaftliche (Begleit-)Forschung ebenfalls energisch vorangetrieben werden. Dies hilft zum einen dabei, mögliche unerwünschte Folgewirkungen frühzeitig zu antizipieren, um gegenzusteuern und auf diese Weise Fehlentwicklungen vorzubeugen. Zum anderen können damit Chancen früher erkannt und das Innovationsgeschehen reflexiver gestaltet werden. Das Einbeziehen einer breiteren Akteursbasis jenseits der technologischen und industriellen Expertenkreise und damit unterschiedlicher Perspektiven ermöglicht es, die technologischen Entwicklungen besser mit den gesellschaftlichen Bedarfen und Anforderungen zu verzahnen.

Ökonomische Folgenforschung etablieren bzw. stärken

Es ist anzunehmen, dass additive Fertigungsverfahren vielfältige wirtschaftliche Auswirkungen haben werden, die in komplexer Weise miteinander interagieren und hochgradig abhängig von den betrachteten Branchen und Anwendungskontexten der Produkte sind. Produktions- und Wertschöpfungsprozesse könnten sich grundlegend wandeln mit Folgen für die Kooperationsbeziehungen zwischen Unternehmen (z.B. zwischen Endhersteller und Zulieferer) und Auswirkungen auf die Art und Anzahl der Beschäftigten. Sie bieten neuen Akteuren (z.B. Start-up-Unternehmen) vielfältige Optionen, mit innovativen Produkten und Geschäftsmodellen in die Märkte der etablierten Produzenten vorzudringen. Technologisch bisher weniger fortschrittliche Länder könnten vom vergleichsweise niedrigschwelligen Einstieg in die additive Fertigung profitieren und so ihren Rückstand zu den etablierten Industrienationen abbauen, was zu Produktionsverlagerungen führen könnte. Die sich bietenden Möglichkeiten für eine dezentrale, bedarfsorientierte Produktion dürften Umwälzungen in der Logistikbranche mit sich bringen.

Welche sozioökonomischen Folgen die vielfältigen wirtschaftlichen Effekte *in der Summe* bei einer flächendeckenden Verbreitung der additiven Fertigung hätten, darüber können derzeit keine seriöse Einschätzungen oder gar belastbare Prognosen abgegeben werden. Die hierfür notwendige systematische theoretische und – soweit derzeit möglich – empirische wirtschaftswissenschaftliche Folgenforschung sollte daher dringend intensiviert werden.

Ökobilanzierung additiver Produktionsszenarien

Für die additiven Fertigungsverfahren lassen sich potenziell positive, aber auch mögliche negative Umweltwirkungen identifizieren. Aus heutiger Sicht ist die Frage, ob sie gegenüber konventionellen Methoden in der Gesamtbilanz ökolo-

gische Vorteile aufweisen, noch offen und auch nicht pauschal, sondern bestenfalls für einzelne Produktkategorien in Abhängigkeit von den betrachteten Produktionsszenarien und Anwendungskontexten der Produkte zu beantworten. Diesbezüglich ist der Forschungsbedarf noch sehr groß.

Risiken für Dual-Use-Anwendungen beobachten 1.4

Werden additive Fertigungsverfahren immer leistungsfähiger, erhöht sich auch das Risiko für Dual-Use-Anwendungen, für welche sie aufgrund ihrer ausgesprochenen Flexibilität besonders prädestiniert sind. Im Besonderen könnten sie Länder, die dazu bisher technisch oder aufgrund von internationalen Handelsbeschränkungen nicht in der Lage waren, befähigen, komplexe Komponenten moderner Waffensysteme (Drohnen, Triebwerke für Lenkraketen etc.) und andere Rüstungsgüter selbstständig herzustellen. Auch könnten aufgrund der digitalen Natur der Fertigungsvorlagen bestehende Ausfuhrbeschränkungen für sensible Rüstungs- und Dual-Use-Güter unterlaufen werden. Risiken für die innere und äußere Sicherheit sollten daher aufmerksam beobachtet werden.

Grundlegende Handlungsansätze zur Verringerung möglicher Risiken sind in Kapitel V.3.2 behandelt und bestehen in der Anpassung der Exportkontrollregime in Bezug auf digitale Vorlagen und additive Fertigungsanlagen (zumindest für besonders leistungsfähige Verfahren) oder der Etablierung technischer Schutzmechanismen.

Privater 3-D-Druck 2.

Vor rund 10 Jahren setzte die Entwicklung von technisch einfachen, dafür aber auch für Privatpersonen erschwinglichen 3-D-Druckern ein, die seitdem immer größere Popularität auch bei weniger technikaffinen Nutzern finden. Aufgrund der technischen Restriktionen bei diesen Geräten wird sich ihr Einsatz bis auf Weiteres auf die Herstellung einfacher Kunststoffgegenstände beschränken. Das in Medienbeiträgen regelmäßig skizzierte Zukunftsbild, wonach künftig Privatpersonen ihren Bedarf an diversen Alltagsgegenständen durch Eigenproduktion aus dem 3-D-Drucker decken, wird sich – wenn überhaupt – noch für längere Zeit nicht realisieren lassen. Für die meisten Produkte wäre dies auch gar nicht sinnvoll, da sie mit den Methoden der konventionellen Massenfertigung auch künftig preiswerter, schneller, ressourcenschonender und in Bezug auf die Produktqualität und -sicherheit besser herzustellen sein werden.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Verbraucherschutz für Erzeugnisse aus privater Herstellung stärken 2.1

Nicht auszuschließen ist jedoch, dass 3-D-Drucker künftig von innovativen Privatanwendern in wachsendem Maße zur Realisierung ihrer Produktideen für eine (gegebenenfalls lokale) Vermarktung eingesetzt werden. In diesem Fall stehen private Akteure genauso wie Unternehmen für die Sicherheit und Fehlerfreiheit ihrer zum Kauf angebotenen Produkte in der Verantwortung. Es ist allerdings davon auszugehen, dass Privatpersonen oft nur unzureichend mit den geltenden Vorschriften vertraut und auch gar nicht in der Lage sind, die ihnen obliegenden Pflichten regelkonform einzuhalten. Inwieweit sich dies zu einem Risiko für die Verbraucher entwickelt, hängt von der weiteren Entwicklung der Gerätetechnik und des Angebots an privat hergestellten Produkten ab. Es könnte perspektivisch notwendig werden, den Verbraucherschutz hinsichtlich solcher Produkte zu stärken. Eine Möglichkeit wäre, für Erzeugnisse aus privater additiver Herstellung eine CE-Kennzeichnungspflicht zu verankern.

Gesundheitliche Risiken durch Emissionen von 3-D-Druckern evaluieren 2.2

Heute verfügbare 3-D-Drucker basieren ganz überwiegend auf dem Schmelzschichtverfahren, bei dem Kunststoffe in einer Düse aufgeschmolzen werden. Dabei entstehen flüchtige organische Verbindungen und/oder ultrafeine Stäube, die eingeatmet von potenziell gesundheitsschädigender Wirkung sind. Die Gefährdungsbeurteilung ist abhängig von den Emissionsraten und der stofflichen Zusammensetzung der Emissionen (und damit von den verwendeten Geräten und Materialien) sowie von den jeweiligen Einsatzbedingungen (Betriebsdauer, Raumlüftung etc.).

Auch wenn es derzeit keine Hinweise auf erhebliche gesundheitliche Risiken und somit Bedarf für Schutzvorkehrungen gibt, ist der Erkenntnisstand hierzu noch unbefriedigend. Weitere, angesichts immer neuer Geräte- und Materialentwicklungen kontinuierliche Forschung zur Gefährdungsbeurteilung erscheint angezeigt.

Entwicklung der privaten additiven Waffenherstellung beobachten und gegebenenfalls Waffenrecht anpassen 2.3

Mithilfe von 3-D-Druckern lassen sich auch Schusswaffen (und andere gefährliche Gegenstände) von Privatpersonen anfertigen, die weitestgehend aus Kunst-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

stoff bestehen und somit mit Metalldetektoren nur schwer zu erkennen sind. Existierende Sicherheitssysteme (z.B. an Flughäfen) und staatliche Schutz- und Kontrollmechanismen (z.B. Waffenregistrierung) können so vergleichsweise einfach ausgehebelt werden. Auch wenn Schusswaffen aus dem 3-D-Drucker derzeit noch primitiver Bauart sind und höchst unzuverlässig funktionieren, sollten potenzielle Gefahren angesichts des schnellen technischen Fortschritts nicht unterschätzt und diesbezügliche Entwicklungen aufmerksam beobachtet werden.

In diesem Zusammenhang besonders kritisch sind im Internet frei verfügbare digitale Vorlagen von Waffen(teilen), denn erst diese befähigen Personen ohne spezielle Fachkenntnisse zur illegalen Waffenherstellung. Das deutsche Waffenrecht deckt zwar den Tatbestand der tatsächlichen Waffenherstellung ab, nicht aber die Erstellung und Verbreitung entsprechender digitaler Vorlagen. Ein Handlungsansatz wäre folglich, auch die Erstellung und Verbreitung solcher Vorlagen unter Erlaubnisvorbehalt zu stellen. Es verbliebe aber immer noch die Möglichkeit, die Vorlagen von ausländischen Onlineplattformen zu beziehen.

Es werden deshalb auch technische Schutzmechanismen diskutiert, z.B. die Ausstattung der Geräte mit Filtersoftware, welche die Herstellung zumindest bestimmter sicherheitskritischer Gegenstände ausschließt, oder Kontrastmittel in den Ausgangsmaterialien, um die Kunststoffwaffen für Detektoren besser sichtbar zu machen. Ob solche Maßnahmen perspektivisch notwendig werden, hängt von der weiteren technischen Entwicklung des privaten 3-D-Drucks ab. Erforderlich hierfür wäre jedenfalls eine enge Kooperation zwischen den Behörden und der Industrie in denjenigen Staaten, in denen Hersteller von Anlagen, Materialien und Software für die additive Fertigung beheimatet sind. Dies zu erreichen ist keine einfache Aufgabe.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Literatur

1. In Auftrag gegebenes Gutachten und Horizon-Scanning

Fraunhofer ISI (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung) (2016): Anwendungs- und Entwicklungsperspektiven der additiven Fertigung für den Wirtschaftsstandort Deutschland (Autoren: Som, O.; Thielmann, A.; Schnabl, E.; Daimer, S.; Berghäuser, H.; Rothengatter, O.). Karlsruhe

VDI/VDE-IT (2015): Horizon Scanning Additive Fertigungsverfahren/3D-Druck. Anwendungen und Potenziale (Autoren: Ehrenberg-Silies, S.; Kind, S.; Jetzke, T.; Bovenschulte, M). Berlin, https://vdivde-it.de/publikation/additive-fertigungsverfahren-3d-druck (1.8.2017)

2. Weitere Literatur

Al-Dabbas, M.A. (2013): Solar sintering of Jordanian silica sand. In: 1st International Conference & Exhibition on the Applications of Information Technology to Renewable Energy Processes and Systems (IT-DREPS), S. 49–54

Alec (2016): Universe Architecture & BAM unveil 3D BUILDER freeform concrete 3D printer to make ›Endless‹ house. In: 3ders.org vom 9.6.2016, www.3ders.org/articles/20160609-universe-architecture-bam-3d-builder-freeform-concrete-3d-printer-to-make-endless-house.html (23.12.2016)

America Makes (2016): America Makes announces a new, five-year cooperative agreement with the Air Force Research Laboratory. Pressemitteilung vom 8.6.2016, www.americamakes.us/news-events/press-releases/item/894-america-makes-announces-a-new-five-year-cooperative-agreement-with-the-air-force-research-laboratory (23.12.2016)

Arcam AB (o. J.): Just Add. Mölndal, www.arcam.com/wp-content/uploads/justaddbrochure-web.pdf (15.7.2016)

Asche, S. (2016a): Keramik aus dem Drucker. In: VDI Nachrichten 3/4, S. 23

Asche, S. (2016b): Mobiler Drucker: Display von Smartphone härtet Photopolymer aus. In: VDI Nachrichten 3/4, S. 23

Asche, S. (2016c): 3D-Druck. Schneller in die dritte Dimension. In: VDI Nachrichten 48, www.vdi-nachrichten.com/Technik/Schneller-in-dritte-Dimension

Asche, S. (2017): 3-D-Druck. Startschuss für die Serienfertigung. In: VDI Nachrichten 21, www.vdi-nachrichten.com/Technik/Startschuss-fuer-Serienfertigung

AWE (Ausschuss für Wirtschaft und Energie) (2016): Entwurf eines Zweiten Gesetzes zur Änderung des Telemediengesetzes. Beschlussempfehlung und Bericht des Ausschusses für Wirtschaft und Energie (9. Ausschuss) zu dem Gesetzentwurf der Bundesregierung – Drucksache 18/6745 –. Deutscher Bundestag, Drucksache 18/8645, Berlin

Azimi, P.; Zhao, D.; Pouzet, C.; Crain, N.E.; Stephens, B. (2016): Emissions of ultrafine particles and volatile organic compounds from commercially available desktop three-dimensional printers with multiple filaments. In: Environmental Science & Technology 50(3), S. 1260–1268

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

BAUA (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin) (2015): Tonerstaub und Emissionen von Druckern und Kopierern am Arbeitsplatz. Dortmund, www.baua.de/dok/674028 (7.10.2016)

Bechthold, L.; Fischer, V.; Hainzlmaier, A.; Hugenroth, D.; Ivanova, L.; Kroth, K.; Römer, B.; Sikorska, E.; Sitzmann, V. (2015): 3D Printing. A qualitative assessment of applications, recent trends and the technology's future potential. Center for Digital Technology and Management (CDTM), München

Berger, U.; Hartmann, A.; Schmid, D. (2013): Additive Fertigungsverfahren. Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing. Haan-Gruiten

BigRep GmbH (2015): BigRep One The Large-Scale FFF 3D-Printer for Professional and Industrial Use. Technical Specifications. Berlin, bigrep.com/wp-content/uploads/2016/05/Technical-Specifications.pdf

BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (Hg.) (2016a): Bildungsoffensive für die digitale Wissensgesellschaft. Strategie des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Berlin, www.bmbf.de/files/Bildungsoffensive_fuer_die_digitale_Wissensgesellschaft.pdf (23.12.2016)

BMBF (Hg.) (2016b): Vorfahrt für den Mittelstand. Das Zehn-Punkte-Programm des BMBF für mehr Innovation in kleinen und mittleren Unternehmen. www.bmbf.de/pub/Vorfahrt_fuer_den_Mittelstand.pdf (14.2.2017)

BMWi (Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie) (Hg.) (2015): Digitale Technologien für die Wirtschaft (PAiCE). Platforms/Additive anufacturing/Imaging/Communication/Engineering. Ein Technologiewettbewerb des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Berlin, bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/paice-digitale-technologien-fuer-die-wirtschaft-bekanntmachung,property=pdf,bereich=bmwi2012, sprache=de,rwb=true.pdf (23.12.2016)

Bräutigam, P.; Klindt, T. (Hg.) (2015): Digitalisierte Wirtschaft/Industrie 4.0. Ein Gutachten der Noerr LLP im Auftrag des BDI zur rechtlichen Situation, zum Handlungsbedarf und zu ersten Lösungsansätzen. bdi.eu/media/themenfelder/digitalisierung/downloads/20151117_Digitalisierte_Wirtschaft_Industrie_40_Gutachten_der_Noerr_LLP.pdf (18.5.2015)

Brooke, R. (2013): China flexes muscles in 3D printing race to the top. In: tct Magazine vom 27.6.2013, www.tctmagazine.com/3D-printing-news/china-flexes-muscles-in-3dp-race/ (23.12.2016)

Buchbinder, D.; Schleifenbaum, H.; Heidrich, S.; Meiners, W.; Bültmann, J. (2011): High Power Selective Laser Melting (HP SLM) of Aluminum Parts. In: Physics Procedia 12, S. 271–278

Bundesregierung (2013a): Polizeiliche Aktivitäten im Zusammenhang mit der Entwicklung und Verbreitung von 3D-Druckern. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Andrej Hunko, Jan Korte, Jan van Aken, weiterer Abgeordneter und der Fraktion DIE LINKE. – Drucksache 17/13993 –. Deutscher Bundestag, Drucksache 17/14293, Berlin

Bundesregierung (2013b): Stand und Perspektiven der Erforschung und des Einsatzes von 3D-Druckern. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten René Röspel, Andrea Wicklein, Dr. Ernst Dieter Rossmann, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der SPD – Drucksache 17/13586 –. Deutscher Bundestag, Drucksache 17/13734, Berlin

Bundesregierung (2015): Entwurf eines Zweiten Gesetzes zur Änderung des Telemediengesetzes. Gesetzentwurf der Bundesregierung. Deutscher Bundestag, Drucksache 18/6745, Berlin

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Butler Millsaps B. (2015): New South Wales, Australia: Parliament Passes Law Banning Possession of 3D Files for Guns. In: 3DPrint.com vom 20.11.2015, 3dprint.com/106940/australia-ban-3d-files-guns/ (18.08.2016)

Captain, S. (2013): Journalists smuggle 3-D printed gun into Israeli parliament. In: NBC News vom 8.7.2013, www.nbcnews.com/technology/journalists-smuggle-3-d-printed-gun-israeli-parliament-6C10570532 (18.8.2016)

Catalano, F. (2015): Boeing files patent for 3D-printed aircraft parts – and yes, it's already using them. In: GeekWire vom 6.3.2015, www.geekwire.com/2015/boeing-files-patent-for-3d-printing-of-aircraft-parts-and-yes-its-already-using-them/ (22.4.2016)

Cesaretti, G.; Dini, E.; De Kestelier, X.; Colla, V.; Pambaguian, L. (2014): Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology. In: Acta Astronautica 93, S. 430–450

CFM International (2016): First LEAP-1A-powered A320neo aircraft delivered to Pegasus Airlines. Pressemitteilung vom 21.7.2016, www.cfmaeroengines.com/press-articles/cfm-news-release-first-leap-1a-powered-a320neo-aircraft-delivered-pegasus-airlines/ (23.12.2016)

Chip.de (2014): Liberator: Pistole aus dem 3D-Drucker im Härtetest. News vom 8.9.2014, www.chip.de/news/Liberator-Pistole-aus-dem-3D-Drucker-im-Haertetest_71395445.html (18.8.2016)

Concept Laser GmbH (2016): Voraus! Topologisch optimierte Bauteile in der Luftfahrt. AEROSPACE 03/2016, www.concept-laser.de/fileadmin/user_upload/1603_Aerospace_DE-EN.pdf (20.4.2017)

Condemarin, M. (2015a): Erster Einsatz eines Brustbein-Implantats aus dem 3D-Drucker geglückt. In: 3D-grenzenlos vom 9.7.2015, www.3d-grenzenlos.de/magazin/forschung/brustbein-implantat-3d-drucker-27117473.html (8.7.2016)

Condemarin, M. (2015b): Kreuzbein-Implantat erstmals mit 3D-Drucker produziert und eingesetzt. In: 3D-grenzenlos vom 11.7.2015, www.3d-grenzenlos.de/magazin/forschung/3d-druck-kreuzbein-implantat-27117903.html (8.7.2016)

Condemarin, M. (2015c): Neue 3D-Scan-App MobileFusion verwandelt jedes Handy in einen mobilen Scanner. In: 3D-grenzenlos vom 25.8.2015, www.3d-grenzenlos.de/magazin/3d-scanner/microsoft-3d-scann-app-27125083.html (6.7.2016)

Condemarin, M. (2015d): 3D-Waffenverbreitung in den USA: Cody Wilsons 3D-Waffenprozess geht weiter. In: 3D-grenzenlos vom 27.8.2015, www.3d-grenzenlos.de/magazin/kurznachrichten/wilsons-3d-waffenprozess-27125743.html (17.8.2016)

Deisinger, U. (2010): Generating porous ceramic scaffolds: Processing and properties. In: Key Engineering Materials 441, S. 155–179

DHL (2016): 3D Printing and the future of supply chains. A DHL perspective on the state of 3D printing and implications for logistics, www.dhl.com/content/dam/downloads/g0/about_us/logistics_insights/dhl_trendreport_3dprinting.pdf (23.12.2016)

Doris (2014): Weltweit erste Wirbelimplantate aus dem 3D-Drucker. In: 3Druck.com vom 19.8.2014, 3druck.com/medizin/weltweit-erste-wirbelimplantate-aus-dem-3d-drucker-3322352/ (6.4.2016)

Doris (2016a): Cooksongold präsentiert Platin Metallpulver für die Additive Fertigung. In: 3Druck.com vom 16.3.2016, 3druck.com/3d-druckmaterialien/cooksongold-praesentiert-platin-metallpulver-fuer-die-additive-fertigung-1543081/ (25.4.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Doris (2016b): Dubai will ein Viertel seiner Gebäude bis 2030 mittels 3D-Drucktechnologie herstellen. In: 3Druck.com vom 29.4.2016, 3druck.com/nachrichten/dubai-will-ein-viertel-seiner-gebaeude-bis-2030-mittels-3d-drucktechnologie-herstellen-0444408/ (3.5.2016)

Eckel, Z.C.; Zhou, C.; Martin, J.H.; Jacobsen, A.J.; Carter, W.B.; Schaedler, T.A. (2016): Additive manufacturing of polymer-derived ceramics. In: Science 351(6268), S. 58–62

EDAG Engineering GmbH (2015): Weltpremiere des Concept Cars »EDAG Light Cocoon« in Genf. Pressemitteilung vom 27.1.2015, Wiesbaden, www.edag.de/de/edag/presse/presseinformationen/pressemitteilungen/news-einzeln/getarticle/News/detail/weltpremiere-des-concept-cars-edag-light-cocoon-in-genf.html (27.4.2016)

EFI (Expertenkommission Forschung und Innovation) (Hg.) (2015): Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands 2015. Berlin

Enzing, C.; Mahieu, B.; Poel, M.; Potau, X.; Beckert, B.; Gotsch, M.; Som, O. (2015): Ex post evaluation and impact assessment of funding in the NMP thematic area. European Commission. Directorate-General for Research and Innovation (Hg.), Brüssel

EOS GmbH (Electro Optical Systems) (2013): Additive Fertigung in der dentalen Prothetik. www.eos.info/branchen_maerkte/download/3D-druck-fuer-dentalmaerkte.pdf (5.4.2016)

EOS (2015): Chinesischer Premierminister Ma Kai besucht mit hochrangiger Delegation EOS, Marktführer für additive Fertigungslösungen. Pressemitteilung von 26.3.2015, www.eos.info/eos_vizepremier_ma_kai_besuch (24.10.2016)

Ernst & Young GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft (2016): How will 3D printing make your company the strongest link in the value chain? EY's Global 3D printing Report 2016. Executive Summary, www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY-3d-druck-studie-executive-summary/$FILE/ey-how-will-3d-printing-make-your-company-the-strongest-link-in-the-value-chain.pdf (23.12.2016)

ESA (European Space Agency) (2015a): Advanced manufacturing. www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/Advanced_Manufacturing (30.6.2016)

ESA (2015b): Hot firing of world's first 3D-printed platinum thruster chamber. www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/Hot_firing_of_world_s_first_3D-printed_platinum_thruster_chamber (30.6.2016)

Esteban Muniz, G. (2016): Additive Manufacturing and 3D-Printing Technologies in the EC. CNRS Workshop on AM am 11.1.2016, Paris, www.cnrs.fr/insis/recherche/docs-evenements/workshop-INSIS_11.01.16_GEsteban.pdf (23.12.2016)

Europäische Kommission (2014): Additive Manufacturing in FP7 and Horizon 2020. Report from the EC Workshop on Additive Manufacturing held on 18 June 2014. Brüssel, www.rm-platform.com/linkdoc/EC%20AM%20Workshop%20Report%202014.pdf (23.12.2016)

Evangelista, R.; Vezzani, A. (2012): The impact of technological and organizational innovations on employment in European firms. In: Industrial and Corporate Change 21(4), S. 871–899

Ferner, J. (2014): 3D-Druck: »Drucken« von Waffen mit einem 3D-Drucker zulässig? www.ferner-alsdorf.de/rechtsanwalt/strafrecht/3d-druck-drucken-von-waffen-mit-einem-3d-drucker-zulaessig/12995 (17.6.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Fey, M. (2016): Waffen aus dem 3D-Drucker. Additives Fertigen als sicherheitspolitisches Risiko? HSFK-Report Nr. 9/2016. Frankfurt a. M., www.hsfk.de/fileadmin/HSFK/hsfk_publikationen/report0916.pdf (18.8.2016)

Fraunhofer IFAM (Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung) (2015): Additive Manufacturing Challenge 2015: Studentenprojekt belegt 1. Platz bei weltweitem Wettbewerb. Pressemitteilung vom 5.3.2015, www.ifam.fraunhofer.de/de/Presse/Archiv/2015/AM_Challenge.html (23.12.2016)

Fraunhofer IWS (Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik) (2016): Dresdner High-Tech aus dem 3D-Drucker. Pressemitteilung vom 12.8.2016, www.iws.fraunhofer.de/de/presseundmedien/presseinformationen/2016/presseinformation_2016-08.html (23.12.2016)

Frost & Sullivan Limited (2013): Market Implications of 3D Printing (Technical Insights). Nine Pronged Technology Evaluation – New Era of Manufacturing and Creativity. D51D-TI

Galia, F.; Ballot, G.; Fakhfakh, F.; Salter, A. (Hg.) (2012): The Fateful Triangle: Complementarities in performance between product, process and organizational innovation in the UK and France. DRUID Society Conference 19.–21.6.2012, Copenhagen Business School (CBS) (Hg.), Kopenhagen

Gartner, Inc. (2014): Gartner Says Uses of 3D Printing Will Ignite Major Debate on Ethics and Regulation. Pressemitteilung vom 29.1.2014, www.gartner.com/newsroom/id/2658315 (18.5.2016)

Gartner, Inc. (2015): Gartner Says Worldwide Shipments of 3D Printers to Reach More Than 490,000 in 2016. Pressemitteilung vom 29.9.2015, www.gartner.com/newsroom/id/3139118 (8.7.2016)

Gausemeier, J.; Glatz, R.; Lindemann, U. (2012): Präventiver Produktschutz. Leitfaden und Anwendungsbeispiele. München

Gebhardt, A. (2007): Generative Fertigungsverfahren. Rapid Prototyping – Rapid Tooling – Rapid Manufacturing. München

Gebhardt, A. (Hg.); Dobischat, R.; Witt, G.; Eich, D.; Marschall, H.; Thurn, L.; Kunkel, M.; Richter, A. (2015): 3D-Drucken in Deutschland: Entwicklungsstand, Potenziale, Herausforderungen, Auswirkungen und Perspektiven. Aachen

Gersemann, K. (2015): 3-D-Druck: Produkthaftung. Noch nicht Druckreif. In: Unternehmensjurist 5, S. 20–24

GESTIS-Stoffdatenbank (2016): Gefahrstoffinformationssystem der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung. gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll?f=templates&fn=default.htm&vid=gestisdeu:sdbdeu (30.9.2016)

Geyer, A.; Som, O.; Kinkel, S.; Tiefenthaler, B.; Gotsch, M.; Maloca, S.; Bierwisch, A.; Kayser, V. (2012): Evaluation des Förderprogramms »Forschung für die Produktion von morgen« 2005 – 2010. Abschlussbericht

Grunewald, S. (2016): The Shuty MP-1 is the Latest 3D Printed Working Semi-Automatic Handgun. In: 3DPrint.com vom 4.2.2016, 3dprint.com/118279/shuty-mp-1-semi-automatic/ (18.8.2016)

Hänninen, O.; Brüske-Hohlfeld, I.; Loh, M.; Stoeger, T.; Kreyling, W.; Schmid, O.; Peters, A. (2010): Occupational and consumer risk estimates for nanoparticles emitted by laser printers. In: Journal of Nanoparticle Research 12(1), S. 91–99

Heil, J.E. (2014): Quantitative, modellbasierte Analyse der Wirkungen generativer Fertigungsverfahren auf die Wertschöpfungskette des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus. Masterarbeit, Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (Hg.), Karlsruhe

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Heumer, W. (2013): Lebensmittelproduktion: Die Pizza kommt in Zukunft aus dem 3-D-Drucker. In: Ingenieur.de vom 4.1.2013, www.ingenieur.de/Themen/Produktion/Lebensmittelproduktion-Die-Pizza-kommt-in-Zukunft-3-D-Drucker (1.7.2016)

Hirt, L.; Ihle, S.; Pan, Z.; Dorwling-Carter, L.; Reiser, A.; Wheeler, J.; Spolenak, R.; Vörös, J.; Zambelli, T. (2016): Template-Free 3D Microprinting of Metals Using a Force-Controlled Nanopipette for Layer-by-Layer Electrodeposition. In: Advanced materials 28(12), S. 2311–2315

Hofmann Innovation Group (2016): Motor aus dem 3D-Drucker: Robert Hofmann GmbH gelingt Meilenstein für den Autobau von morgen. In: 3Druck.com vom 30.9.2016, 3druck.com/pressemeldungen/motor-aus-dem-3d-drucker-robert-hofmann-gmbh-gelingt-meilenstein-fuer-den-autobau-von-morgen-1649577/ (23.12.2016)

Honsel, G. (2015): Von der Pistole zum Promi. In: Technology Review vom 10.3.2015, heise.de/-2571294 (17.8.2016)

Horch, W. (2016): Airbus lernt von Seerosen und treibt 3D-Druck voran. In: Hamburger Abendblatt vom 13.2.2016, https://www.abendblatt.de/hamburg/article207040061/Airbus-lernt-von-Seerosen-und-treibt-3D-Druck-voran.html (17.8.2016)

Hottelet, U. (2013): Waffendrucker im Visier. In: Technology Review vom 21.11.2013, heise.de/-2046759 (17.8.2016)

Huang S.; Liu, P.; Mokasdar, A.; Hou, L. (2013): Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 67(5–8), S. 1191–1203

Huang, R.; Riddle, M.; Graziano, D.; Warren, J.; Das, S.; Nimbalkar, S.; Cresko, J.; Masanet, E. (2016): Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. In: Journal of Cleaner Production 135, S. 1559–1570

Hultgren, K. (2014): Print-in-Place: The Additive Holy Grail. In: Make: vom 10.11.2014, makezine.com/2014/11/10/print-in-place-the-additive-holy-grail/ (11.7.2016)

IGCC (Institute on Global Conflict and Cooperation) (2016): Planning For Innovation: Understanding China's Plans for Technological, Energy, Industrial, and Defense Development. A report prepared for the U.S.-China Economic and Security Review Commission, www.uscc.gov/sites/default/files/Research/Planning%20for%20Innovation-Understanding%20China%27s%20Plans%20for%20Tech%20Energy%20Industrial%20and%20Defense%20Development072816.pdf (23.12.2016)

Innovate UK (2016): Mapping UK Research and Innovation in Additive manufacturing. A review of the UK's publicly funded R&D activities in additive manufacturing between 2012 and 2015. www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/505246/CO307_Mapping_UK_Accessible.pdf (23.12.2016)

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. In: Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K.; Tignor, M.; Miller, H. (Hg.): IPCC Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4). Assessment. Cambridge/New York

Johannes (2011): Geldautomaten-Betrug mit Hilfe von 3D-Druckern. In: 3Druck.com vom 25.9.2011, 3druck.com/nachrichten/geldautomaten-betrug-mit-hilfe-von-3d-druckern-491834/ (22.8.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Jurran, N. (2016): Generalschlüssel für Gepäck: Weiterer TSA Master Key veröffentlicht. In: Heise-Online vom 24.7.2016, www.heise.de/newsticker/meldung/Generalschluessel-fuer-Gepaeck-Weiterer-TSA-Master-Key-veroeffentlicht-3277250.html (22.8.2016)

Kellner, T. (2015): The FAA Cleared the First 3D Printed Part to Fly in a Commercial Jet Engine from GE. In: GE Reports vom 14.4.2015, www.gereports.com/post/116402870270/the-faa-cleared-the-first-3d-printed-part-to-fly/ (22.4.2016)

Kempkens, W. (2015): Airbus forciert 3D-Druck beim Flugzeugbau. In: Ingenieur.de vom 17.8.2015, www.ingenieur.de/Themen/3D-Druck/Airbus-forciert-3D-Druck-Flugzeugbau (22.4.2016)

Kietzmann, J.; Leyland, P.; Berthon, P. (2015): Disruptions, decisions, and destinations. Enter the age of 3-D printing and additive manufacturing. In: Business Horizons 58(2), S. 209–215

Klempert, O. (2015): Schilddrüse aus dem 3-D-Drucker. In: VDI Nachrichten 47, www.vdi-nachrichten.com/Technik-Wirtschaft/Schilddruese-3-D-Drucker (1.4.2016)

Krämer, A. (2014): Medizin: UMC Utrecht verpflanzt künstliche Schädeldecke aus dem 3DDrucker. In: 3D-Grenzenlos vom 29.3.2014, www.3d-grenzenlos.de/magazin/forschung/schaedel-aus-3d-drucker-erstmals-erfolgreich-verpflanzt-2738033.html (6.4.2016)

Krämer, A. (2015): Forschungsprojekt der Bundeswehr macht 3D-Druck für die Einsatzplanung in Krisensituationen nutzbar. In: 3D-Grenzenlos vom 16.12.2015, www.3d-grenzenlos.de/magazin/forschung/bundeswehr-mit-photogrammetrie-und-3d-druck-27145673.html (5.7.2016)

Krämer, A. (2016a): Nike entwickelt Spikeschuh »Zoom Superfly Flyknit« mit 3D-Drucker. In: 3D-Grenzenlos vom 21.3.2016, www.3d-grenzenlos.de/magazin/3d-objekte/nike-zoom-superfly-flyknit-mit-3d-drucker-27166423.html (1.7.2016)

Krämer, A. (2016b): Kalifornien: Mehrere neue Gesetze in Kalifornien erfordern die Registrierung für Waffen aus einem 3D-Drucker. In: 3D-Grenzenlos vom 26.6.2016, www.3d-grenzenlos.de/magazin/kurznachrichten/kalifornien-gesetz-zur-registrierung-von-3d-waffen-27182353.html (18.8.2016)

Krämer, A. (2016c): Forensik: Finger aus 3D-Drucker soll das Handy des Mordopfers entsperren. In: 3D-Grenzenlos vom 26.7.2016, www.3d-grenzenlos.de/magazin/kurznachrichten/finger-aus-3d-drucker-forensik-27182163.html (23.8.2016)

Krämer, A. (2016d): 3D-Drucker für Kinder: Toys »R« Us bietet zukünftig 3D-Drucker an. In: 3D-Grenzenlos vom 12.10.2016, www.3d-grenzenlos.de/magazin/kurznachrichten/toys-r-us-verkauft-3d-drucker-27193393.html (28.10.2016)

Krassenstein, B. (2014): Chinese Reportedly Use 3D Printing to Triumph the Most Advanced US Fighter Jet. In: 3DPrint.com vom 30.6.2014, 3dprint.com/7682/j-25-3d-printed-fighter-china/ (23.12.2016)

Krassenstein, B. (2015a): Chinese Government to Put 3D Printers in All 400,000 Elementary Schools by Next Year. In: 3DPrint.com vom 8.4.2015, 3dprint.com/56699/china-3d-printers-schools/ (23.12.2016)

Krassenstein, B. (2015b): US Government Proposes ITAR Amendments to Choke off Distribution of 3D Printable Gun Models. In: 3DPrint.com vom 8.6.2015, 3dprint.com/71532/itar-3d-print-guns/ (18.8.2016)

LASI (Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik) (2014): Handlungsanleitung für die Ausführung der Marktüberwachung in Deutschland LV 36. http://lasi-info.com/uploads/media/LV_36_2016_02.pdf (27.5.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Leupold, A.; Glossner, S. (2016): 3D-Druck, Additive Fertigung und Rapid Manufacturing. Rechtlicher Rahmen und unternehmerische Herausforderung. München

Lim, S.; Buswell, R.; Le, T.; Austin, S.; Gibb, A.; Thorpe, T. (2012): Developments in construction-scale additive manufacturing processes. In: Automation in Construction 21, S. 262–268

Lindekamp, C. (2015): Das Knie aus dem 3D-Drucker. In: Handelsblatt vom 12.4.2015, www.handelsblatt.com/technik/hannovermesse/medizintechnik-das-knie-aus-dem-3d-drucker/11623150.html (6.4.2016)

Lithoz GmbH (2015): Manufacture the Future. Ihr Systemanbieter für die additive Fertigung von Hochleistungskeramiken. www.lithoz.com/upload/1424844_lithoz_folder012015_DE_webres.pdf (23.12.2016)

Local Motors (2015): Press Kit. Pressemitteilung vom 2015, lm-staticimages.s3.amazonaws.com/3d-printed-car-press-kit/SEMA-2015-3d-Printed-Car-Press-Kit.zip (23.12.2016)

Mandrycky, C.; Wang, Z.; Kim, K.; Kim, D. (2016): 3D bioprinting for engineering complex tissues. In: Biotechnology Advances 34(4), S. 422–434

MarkForged, Inc. (2016): Same Day. Strong Parts., https://www.3dhubs.com/s3fs-public/Markforged.pdf (21.11.2016)

Materialise (2015): Materialise to Deliver 3D-Printed, Flight-Ready Plastic Parts for Airbus. Pressemitteilung vom 17.11.2015, www.materialise.com/press/materialise-to-deliver-3d-printed-flight-ready-plastic-parts-for-airbus (22.4.2016)

Mesaric E. (2010): Additive Fertigungsverfahren treiben die Medizintechnik voran. In: MM Maschinenmarkt 44/2010, S. 24–27

Molitch-Hou, M. (2015): A Smartphone 3D Printer & Why You Might Move to Taiwan (Part 1). 3dprintingindustry.com (Hg.), 3dprintingindustry.com/news/3d-printing-with-a-smartphone-why-you-might-move-to-taiwan-63642/ (21.11.2016)

MTU Aero Engines AG (2014): Trailblazing technology: MTU Aero Engines produces parts by additive manufacturing. Borescope bosses for A320neo Geared TurbofanTM are made by selective laser melting. Pressemitteilung vom 13.3.2014, www.mtu.de/news-media/press/latest-press-releases/press-release-detail/?tx_news_pi1%5Bnews%5D=24&cHash=7fabd1d381ebb5ab509b8009f31cce61 (26.6.2016)

Murphy, S.; Atala, A. (2014): 3D bioprinting of tissues and organs. In: Nature biotechnology 32(8), S. 773–785

Navrotsky, V.; Graichen, A.; Brodin, H. (2015): Industrialisation of 3D printing (additive manufacturing) for gas turbine components repair and manufacturing. In: VBG PowerTech 12, S. 48–52

Nitz, S. (2015): 3D-Druck. Der praktische Einstieg. Galileo Computing, Bonn

NTU (Nanyang Technological University) (2016): NTU launches 3D printing centre. Pressemitteilung vom 17.5.2016, media.ntu.edu.sg/NewsReleases/Pages/newsdetail.aspx?news=c8d3eeed-13b8-48dd-b706-aa1a8263a52d (23.12.2016)

Oberndorfer, D. (2015): Additive Fertigung für medizinische Implantate. In: ke NEXT.de vom 20.1.2015, www.ke-next.de/specials/medizintechnik/additive-fertigung-fuer-medizinische-implantate-129.html (7.7.2016)

Peels, J. (2016): See how dentistry is benefiting from metal 3D Printing. www.sinterex.com/metal-3d-printing-and-additive-manufacturing-blog/2016/6/13/see-how-dentistry-is-benefiting-from-metal-3d-printing (23.12.2016)

Peters, S. (2015): Additive Fertigung. Der Weg zur individuellen Produktion. Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung (Hg.), Schriftenreihe der Technologielinie Hessen-Nanotech 25, Wiesbaden

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Petschow, U.; Ferdinand, J.-P.; Dickel, S.; Flämig, H.; Steinfeldt, M.; Worobei, A. (2014): Dezentrale Produktion, 3D-Druck und Nachhaltigkeit. Trajektorien und Potenziale innovativer Wertschöpfungsmuster zwischen Maker-Bewegung und Industrie 4.0. Schriftenreihe des IÖW 206/14, Berlin, www.ioew.de/fileadmin/_migrated/tx_ukioewdb/IOEW_SR_206_Dezentrale_Produktion_3D-Druck_und_Nachhaltigkeit.pdf (6.9.2016)

Piller, F. (2006): User Innovation: Der Kunde als Initiator und Beteiligter im Innovationsprozess. In: Drossou, O.; Krempl, S. (Hg.): Open Innovation. Freier Austausch von Wissen als soziales, politisches und wirtschaftliches Erfolgsmodell, Hannover

Premium Aerotec (2016): Premium AEROTEC startet Serienproduktion für gedruckte Bauteile aus Titan. Pressemitteilung vom 20.1.2016, https://www.premium-aerotec.com/medien/pressemeldungen/premium-aerotec-startet-serienproduktion-fuer-gedruckte-bauteile-aus-titan (10.8.2017)

Radig, G. (2015): Berufsbild »Verfahrensmechaniker additive Fertigung«. In: VDI-Z. Integrierte Produktion 05, www.ingenieur.de/VDI-Z/2015/Ausgabe-05/Werkzeug-und-Formenbau/Berufsbild-Verfahrensmechaniker-additive-Fertigung (7.12.2016)

Richter, S.; Wischmann, S. (2016): Additive Fertigungsmethoden – Entwicklungsstand, Marktperspektiven für den industriellen Einsatz und IKT-spezifische Herausforderungen bei der Forschung und Entwicklung. Berlin, www.vdivde-it.de/publikationen/studien/additive-fertigungsmethoden/at_download/pdf (7.6.2016)

Roland Berger GmbH (2013): Additive manufacturing – A game changer for the manufacturing industry? München

Schmieder, J. (2013): Prekärer Schlüsseltrick. In: Süddeutsche Zeitung vom 22.8.2013, www.sueddeutsche.de/wissen/kriminalitaet-und-d-drucker-prekaerer-schluesseltrick-1.1751979 (23.8.2016)

Schürmann, H. (2015): 3-D-Drucker verändern den Bau von Häusern. In: VDI Nachrichten 49, www.vdi-nachrichten.com/Technik-Wirtschaft/3-D-Drucker-veraendern-Bau-Haeusern (12.12.2016)

Schürmann, H. (2016): Holzobjekte wachsen in Stunden – inklusive der Jahresringe. In: VDI Nachrichten 6, www.vdi-nachrichten.com/Technik-Wirtschaft/Holzobjekte-wachsen-in-Stunden-inklusive-Jahresringe (12.12.2016)

Scott, C. (2015): Cosyflex: Tamicare's 3D Textile Printing Technology Goes into Mass Production. In: 3DPrint.com vom 23.12.2015, 3dprint.com/112264/tamicare-cosyflex-production/ (29.4.2016)

Send, H. (2013): Fabriken für alle: Revolutionieren 3-D-Drucker und Open-Source-Software unser Leben? Heinrich Böll Stiftung, Grüne Akademie (Hg.), www.boell.de/sites/default/files/uploads/2013/12/fabriken_fuer_alle.pdf (12.12.2016)

SLM Solutions Group AG (o.J.): Selective Laser Melting Maschine SLM 500. slm-solutions.de/produkte/maschinen/selective-laser-melting-maschine-slm-500 (24.11.2016)

Solmecke, C.; Kocatepe, S. (2014): Der 3D-Druck - Ein neuer juristischer Zankapfel? In: Kommunikation & Recht 12, S. 778–783

Som, O. (2012): Innovation without R&D. Heterogeneous Innovation Patterns of Non-R&D-Performing Firms in the German Manufacturing Industry. Wiesbaden

Som, O.; Kinkel, S. (2012): Zukunftspotenziale und Beschäftigung nicht FuE-intensiver Industriesektoren und Industriebetriebe in Deutschland. In: Allespach, M.; Ziegler, A. (Hg.): Zukunft des Industriestandortes Deutschland 2020. Marburg, S. 89–114

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

State Council of PRC (The State Council of the People's Republic of China) (2015): »Made in China 2025« plan issued. Pressemitteilung vom 19.5.2015, english.gov.cn/policies/latest_releases/2015/05/19/content_281475110703534.htm (23.12.2016)

Stauß, O. (2015): Additiv ja – aber nur wo nötig. In: Industrieanzeiger 29(15), S. 60–63

Steck, R. (2015): Euromold: Immer mehr 3D-Drucker mit Laser-Technik. In: Heise-Online vom 24.9.2015, www.heise.de/make/meldung/Euromold-Immer-mehr-3D-Drucker-mit-Laser-Technik-2825253.html (21.11.2016)

Stratasys (2015a): Brillantes Design Zukunftsweisende Vielseitigkeit und Realitätstreue mit dem weltweit einzigartigen Vollfarbdruck- Multimaterial-3d- Drucker. www.stratasys.com/de/landing/stratasys_j750_ebook (21.11.2016)

Stratasys (2015b): Stratasys Additive Manufacturing Solutions Selected by Airbus to Produce 3D Printed Flight Parts for Its A350 XWB Aircraft. Pressemitteilung vom 6.5.2015, investors.stratasys.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=911116 (22.4.2016)

TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2014): Offene Innovationsprozesse als Cloud-Services (Autoren: Ehrenberg-Silies, S.; Compagna, D.; Schwetje, O.; Bovenschulte, M.). TAB-Horizon-Scanning Nr. 1, Berlin

Teschler, L. (2013): Chinese look to dominate 3D printing. Asian nations have noticed that 3D printing is mushrooming and intend have a major on the industry. In: machine design vom 9.7.2013, machinedesign.com/3d-printing/chinese-look-dominate-3d-printing (23.12.2016)

Tess (2016): South African government launches new 3D printing strategy to compete in global market. In: 3ders.org vom 29.8.2016, www.3ders.org/articles/20160829-south-african-government-launches-new-3d-printing-strategy-to-compete-in-global-market.html (23.12.2016)

Thiesse, F.; Wirth, M.; Kemper, H.-G.; Minshall, T.. (2015): Economic Implications of Additive Manufacturing and the Contribution of MIS. In: Business & Information Systems Engineering 57(2), S. 139–148

Thum, M. (2013): Philadelphia verbietet Herstellung von Waffen mit dem 3D-Drucker. In: 3D-Grenzenlos vom 25.11.2013, www.3d-grenzenlos.de/magazin/kurznachrichten/philadelphia-verbietet-herstellung-von-liberator-2711953.html (18.8.2016)

Trechow, P. (2016): Ein vielversprechender Zylinderblock. Prototyping exclusiv. In: VDI Nachrichten 45, www.iqm.de/fileadmin/user_upload/Medien/Zeitungen/VDI_Nachrichten/Downloads/VDIn_ePaper_Exklusiv_3-D-Druck_20161111.pdf (25.11.2016)

Tumbleston, J.; Shirvanyants, D.; Ermoshkin, N.; Janusziewicz, R.; Johnson, A.; Kelly, D.; Chen, K.; Pinschmidt, R.; Rolland, J.; Ermoshkin, A.; Samulski, E.; DeSimone, J. (2015): Additive Manufacturing. Continuous liquid interface production of 3D objects. In: Science 347(6228), S. 1349–1352

UK Ministry of Defence (2015): Strategic Trends Programme. Future Operating Environment 2035, www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/484861/20151203-DCDC_FOE_35.pdf (18.8.2016)

UPS (2016): UPS To Launch On-Demand 3D Printing Manufacturing Network. Collaboration with SAP will add an Industrial-strength Solution for Supply Chain Management as Part of On-demand Network. Pressemitteilung vom 18.5.2016, https://www.pressroom.ups.com/pressroom/ContentDetailsViewer.page?ConceptType=PressReleases&id=1463510444185-310 (29.08.2016)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

van der Zee, F.; Rehfeld, D.; Hamza, C. (2015): Open Innovation in Industry, Including 3D Printing. Europäische Kommission, DG Internal Policies, Policy Department A: Economic and Scientific Policy, IP/A/ITRE/2014-12 (Hg.), Brüssel

VDI (Verein Deutscher Ingenieure e.V.) (2014): Statusreport Additive Fertigungsverfahren. Düsseldorf

VDI (2016): Handlungsfelder Additive Fertigungsverfahren. Düsseldorf, www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/gpl_dateien/6242_PUB_GPL_Handlungsfelder_-_Additive_Fertigungsverfahren_Internet.pdf (7.6.2016)

Vergin, A.; Hetzer, H.; Heuer, W.; Wellbrink, J. (2013): Potenziale additiver Fertigungsverfahren. Was können 3D-Drucker. Future Topic. Berlin, www.planungsamt.bundeswehr.de/resource/resource/MzEzNTM4MmUzMzMyMmUzMTM1MzMyZTM2MzIzMDMwMzAzMDMwMzAzMDY4NzE2NjMzNzg2YjdhNjMyMDIwMjAyMDIw/Future%20Topic%203D-Druck.pdf (4.7.2016)

Vogt, S. (2016): Von der Idee zur Perfektion. Die Erschaffung eines Schmuckstücks durch Stereolithographie mit Hilfe des ASIGA Pico 2 und SuperWAX. schmuckmagazin.de/wp-content/uploads/2016/02/Custom_Cad_Studie2016.pdf (25.4.2016)

Voxeljet AG (2013): VXC800 – Der 3D-Endlosdrucker. www.voxeljet.de/fileadmin/Voxeljet/Systems/VXC800/3D-Drucker_VXC800_dt_2012-11-16.pdf (21.11.2016)

Wang, X.; Xu, S.; Zhou, S.; Xu, W.; Leary, M.; Choong, P.; Qian, M.; Brandt, M.; Xie, Y.. (2016): Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: A review. In: Biomaterials 83, S. 127–141

Wheeler, A. (2015): Stratasys Fortus 450mc. In: Engineering.com vom 2.11.2015, www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/10905/Stratasys-Fortus-450mc.aspx (8.7.2016)

Wilkens, A. (2013): US-Regierung und australische Polizei besorgt über Waffen aus 3D-Druckern. In: Heise-Online vom 24.5.2013, heise.de/-1868818 (18.8.2016)

Wilson, J.; Piya, C.; Shin, Y.; Zhao, F.; Ramani, K. (2014): Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis. In: Journal of Cleaner Production 80, S. 170–178

Wittbrodt, B.; Glover, A.; Laureto, J.; Anzalone, G.; Opplinger, D.; Irwin, J.; Pearce, J. (2013): Life-cycle economic analysis of distributed manufacturing with open-source 3-D printers. In: Mechatronics 23(6), S. 713–726

Wohlers Associates (2012): Wohlers Report. Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry. Annual Worldwide Progress Report. Fort Collins

Wohlers Associates (2015): Wohlers Report. Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry. Annual Worldwide Progress Report. Fort Collins

Wohlers, T.; Caffrey, T. (2016): Additive Manufacturing: The State of the Industry. In: Manfacturing Engineering 5, S. 45–52

Wu, P.; Wang, J.; Wang, X. (2016): A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. In: Automation in Construction 68, S. 21–31

Yampolskiy, M.; Skjellum, A.; Kretzschmar, M.; Overfelt, R.; Sloan, K.; Yasinsac, A. (2016): Using 3D printers as weapons. In: International Journal of Critical Infrastructure Protection 14, S. 58–71

Yi, J.; LeBouf, R.; Duling, M.; Nurkiewicz, T.; Chen, B.; Schwegler-Berry, D.; Virji, M.; Stefaniak, A.(2016): Emission of particulate matter from a desktop three-dimensional (3D) printer. In: Journal of toxicology and environmental health. Part A 79(11), S. 453–465

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Zanker, C.; Som, O.; Buschak, D. (2014): Industrieller Mittelstand: Spitzenstellung in Gefahr? Analyse zur Innovationsfähigkeit kleiner und mittlerer Unternehmen in der Metropolregion Stuttgart. Stuttgart

Zocca, A.; Colombo, P.; Gomes, C.; Günster, J. (2015): Additive Manufacturing of Ceramics. Issues, Potentialities, and Opportunities. In: Journal of the American Ceramic Society 98(7), S. 1983–2001

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Anhang

Abbildungen 1.

Abb. II.1	Spritzgießwerkzeugeinsatz mit konturnaher Kühlung	38
Abb. II.2	Sandkern (links) für die Herstellung eines Turbinenrads (rechts)	38
Abb. II.3	Konventionell (oben) und additiv gefertigter (unten) Kabinenhalter für den Airbus A350 XWB	40
Abb. II.4	Computerdarstellung und Detailansicht des LM3D Swim	43
Abb. II.5	Additiv aufgebrachte elektrische Leiterbahnen	44
Abb. II.6	Brücke und dentaltechnisches Modell aus additiver Fertigung	46
Abb. II.7	Ohrpassstücke aus additiver Fertigung	46
Abb. II.8	Maiskolben aus dem Foodini (links) Zuckerskulptur aus dem ChefJet (rechts)	54
Abb. II.9	3-D-Drucker MakerBot Replicator+ (links) versus industrielle Anlage Fortus 450mc (rechts)	59
Abb. II.10	Gegenstände aus 3-D-Modellen von der Onlineplattform Thingiverse	60
Abb. III.1	Prozessmodell der additiven Fertigung	65
Abb. III.2	Klassifizierung additiver Fertigungsverfahren	67
Abb. III.3	Die Armbanduhr Jelwek Watch aus Holz	69
Abb. III.4	Mittels 2PP hergestelltes Modell im µm-Maßstab	71
Abb. III.5	Anatomisches Funktionsmodell mit der Haptik echten Gewebes	73
Abb. III.6	Mit SLM gefertigte Kühlsysteme	75
Abb. III.7	Hochleistungsanlage für SLM: X LINE 2000R	76
Abb. III.8	Solarsintern	79
Abb. III.9	Sandsteinskulptur Rariolaria (1,6 m hoch)	80
Abb. III.10	Villa in Shanghai mit additiv gefertigten Wandelementen	81
Abb. III.11	Wechselwirkungsdreieck Anlage – Werkstoff – Parameter	83
Abb. IV.1	Trade-off zwischen Effizienz und Flexibilität in der konventionellen im Vergleich zur additiven Fertigung	90

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abb. IV.2	Anzahl verkaufter industrieller additiver Fertigungsanlagen (weltweit und in Deutschland)	92
Abb. IV.3	Länderanteile installierter Anlagen (kumuliert 1988–2014)	93
Abb. IV.4	Im Jahr 2014 installierte Anlagen nach Ländern	93
Abb. IV.5	Publikations- und Patentdynamik	103
Abb. IV.6	Publikations- (oben) und Patentdynamik (unten) differenziert nach Einsatzgebiet	104
Abb. IV.7	Publikationsdynamik mit Länderverteilung	105
Abb. IV.8	Patentdynamik mit Länderverteilung	106
Abb. IV.9	Anteil und Dynamik der Publikationen nach Branchen (Welt)	109
Abb. IV.10	Anteil und Dynamik der Publikationen nach Branchen (USA)	110
Abb. IV.11	Anteil und Dynamik der Publikationen nach Branchen (Deutschland)	111
Abb. IV.12	Anteil und Dynamik der Publikationen nach Branchen (China)	111
Abb. IV.13	Spezialisierung Deutschlands und der USA nach Branchen	113
Abb. V.1	Treibhausgasemissionen für verschiedene Varianten der Handyschalenproduktion	165
Abb. V.2	Additive Reparatur vs. konventioneller Neubau	167
Abb. V.3	Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen unterschiedlicher 3-D-Drucker-Material-Kombinationen	171
Abb. V.4	Additiv gefertigte Teile für die Schusswaffe Liberator	175

Tabellen 2.

Tab. IV.1	Förderung der additiven Fertigung im Ausland (Auswahl)	97
Tab. IV.2	Aktuelle Forschungsvorhaben des BMBF (Auswahl)	100
Tab. IV.2	Die 30 führenden Patentanmelder im Bereich der additiven Fertigung (2003–2012)	107
Tab. IV.3	Anbieter- und Anwenderbranchen der additiven Fertigung	108
Tab. IV.9	Mögliche Umsetzungsabfolge bzw. Priorisierung von Handlungsoptionen	141
Tab. V.1	Schadstoffkonzentration in der Atemluft	172

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Tab. A.1 Strukturmerkmale der befragten Unternehmer 241
Tab. A.2 Liste der teilnehmenden Experten am Workshop vom 25. Februar 2016 242

Abkürzungen 3.

2PP	2-Photonen-Polymerisation
3-D	dreidimensional
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol Copolymere
AMF	Additive Manufacturing File
CAD	Computer Aided Design
CLIP	Continuous Liquid Interface Production
CNC	Computerized Numerical Control
DLP	Digital Light Processing
EBM	Electron Beam Melting
FabLabs	Fabrication Laboratories
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
FLM	Fused Layer Modeling
FluidFM	Fluidic Force Microscopy
GU	Großunternehmen
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
LCM	Lithography-based Ceramic Manufacturing
LLM	Layer Laminate Manufacturing
MS	(selektives) Maskensintern
PEEK	Polyetheretherketone
PET	Polyethylenterephthalat
PLA	Polylactide
SLA	Stereolithografie
SLM	Selective Laser Melting
SLS	selektives Lasersintern
STL	Standard Tessellation Language

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Qualitative Experteninterviews 4.

Die Gutachterinnen und Gutachter des Fraunhofer ISI (2016, S. 109 ff.) haben insgesamt 18 Experteninterviews durchgeführt. Diese dienten dazu, das Erfahrungswissen in Bezug auf die Anwendung additiver Fertigungsverfahren in der industriellen Praxis zu erschließen. Befragt wurden Fachleute aus der Wirtschaft, Wissenschaft sowie aus Verbänden und Organisationen.

Weil der Fokus auf den Anwendungspotenzialen der additiven Fertigung im verarbeitenden Gewerbe lag, wurden zwei Drittel der Interviews mit Unternehmensvertretern geführt. Mehrheitlich handelte es sich um Unternehmen, die additive Fertigungsverfahren in ihre betrieblichen Prozesse bereits integriert hatten (Anwender). Befragt wurden auch Vertreter von Unternehmen, die noch nicht oder nicht mehr zum Anwenderkreis gehörten, was einen vertieften Blick auf mögliche Hürden und Hemmnisse für die Anwendung additiver Fertigungsverfahren ermöglichen sollte (potenzielle Anwender). Bei der Auswahl wurde darauf geachtet, die Bandbreite verschiedener Unternehmensgrößen abzudecken sowie wesentliche Branchen des deutschen verarbeitenden Gewerbes zu berücksichtigen (Automobilindustrie, metallverarbeitende Unternehmen, Anlagen- und Werkzeugbau, Anbieter von Ingenieurdienstleistungen). Auch wurden Unternehmen mit unterschiedlichen Stellungen in der Wertschöpfungskette ausgewählt, wobei die technischen Prozessspezialisten überwogen, da diesen eine wichtige Rolle bei der Diffusion additiver Fertigungsverfahren in die industrielle Praxis zugesprochen wird. Tabelle A.1 führt die Strukturmerkmale der befragten Unternehmen auf.

Ergänzend zur Befragung von Unternehmern wurden Gespräche mit zwei Verbandsvertretern geführt, die über eine breite Erfahrung mit (möglichen) Anwenderunternehmen im Bereich der additiven Fertigung verfügten.

Darüber hinaus wurden drei Experten aus der Wissenschaft befragt. Hier lagen die Auswahlkriterien einerseits auf einer möglichst großen Anwendernähe der Entwicklung (anwendungsnahe Forschung und Entwicklung) sowie andererseits darauf, dass die Gesprächspartner einen breiten Überblick über die unterschiedlichen additiven Fertigungsverfahren besaßen. Die befragten Wissenschaftler verfügten aufgrund diverser Aktivitäten in Gremien und Verbünden über einen weitreichenden Einblick in die Thematik. Zur Einordnung der Befunde insgesamt dienten schließlich die Einschätzungen eines internationalen Technologieexperten.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Tab. A.1 Strukturmerkmale der befragten Unternehmer

Beschäftig-tenzahl	Branche	Kunden	Unternehmenstyp nach Som (2012)
		Anwender	
< 10	industrienaher wissensintensiver Service	Automotive	kundengetriebener, technischer Prozess-spezialist
< 10	industrienaher wissensintensiver Service	verschiedene Branchen	wissensintensiver Produktinnovator
< 10	industrienaher wissensintensiver Service	Entwicklung von Sondermaschinen, Montageanlagen u. Automatisierungslösungen	kundengetriebener, technischer Prozess-spezialist
< 50	industrienaher wissensintensiver Service; Metall- u. Kunststoffverarbeitung	Medizintechnik, Gerätetechnik, Automotive, teilweise Klima- und Energietechnik	kundengetriebener, technischer Prozess-spezialist
< 50	Maschinen- und Anlagenbau	Verpackungsindustrie, Logistik	kundengetriebener, technischer Prozess-spezialist
< 250	Metall- und Kunststoffverarbeitung	Automotive	kundengetriebener, technischer Prozess-spezialist
< 250	Metall- und Kunststoffverarbeitung	verschiedene Branchen	spezialisierter Zulieferer
> 1.000	Elektro- und Haushaltsgeräte	Handel	wissensintensiver Produktinnovator/ Konsumgüterhersteller mit gelegentlicher Produktentwicklung
> 1.000	Maschinen- und Anlagenbau	verschiedene Branchen	spezialisierter Zulieferer
		potenzielle Anwender	
< 250	Metallverarbeitung	Automotive	kundengetriebener, technischer Prozess-spezialist
< 250	Metall- und Kunststoffverarbeitung	Automotive, Luftfahrt, Medizintechnik, teilweise Elektroindustrie	spezialisierter Zulieferer, Lohnfertiger
> 250	Möbel und Büromöbel	Handel	Konsumgüterhersteller mit gelegentlicher Produktentwicklung

Quelle: Fraunhofer ISI 2016, S. 110

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Die telefonisch geführten Experteninterviews fanden zwischen dem 12. Oktober und dem 11. November 2015 statt und dauerten im Durchschnitt 45 Minuten. Der Fokus der Gespräche, wobei je nach Gesprächspartner (Unternehmen, Wissenschaft, Intermediäre) die Schwerpunktsetzung leicht variiert wurde, lag auf den folgenden drei Perspektiven:

- der technischen Perspektive (z.B. technische Treiber, Barrieren);
- der unternehmensinternen Perspektive (z.B. interne Prozesse, Organisation, Kompetenzen);
- der unternehmensexternen Perspektive (z.B. Netzwerke, Kooperationen, politische Förderung).

5. Liste der teilnehmenden Experten am Workshop

Die in Kapitel IV.2 aufgeführten Thesen zu den absehbaren Entwicklungen, Hemmnissen und Gestaltungsfeldern bei der Anwendung additiver Fertigungsverfahren in der deutschen Industrie wurden im Rahmen eines projektinternen Expertenworkshops diskutiert. Der Workshop fand am 25. Februar 2016 in den Räumen des Deutschen Bundestages statt und richtete sich auch an interessierte Abgeordnete des Deutschen Bundestages sowie an Mitarbeiter der Abgeordneten und der Fraktionen. Tabelle A.2 listet die teilnehmenden Experten in alphabetischer Reihenfolge auf.

Tab. A.2 Liste der teilnehmenden Experten am Workshop vom 25. Februar 2016

Name	Institution/Unternehmen
Dipl.-Ing. Andreas Berkau	Geschäftsführer citim GmbH
Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer	Lehrstuhl für Kunststofftechnik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Sprecher des Sonderforschungsbereichs »Additive Fertigung« der DFG
Prof. Dr. Dr. Jürgen Ensthaler	Lehrstuhl für Wirtschafts-, Unternehmens- und Technikrecht an der TU Berlin
Rainer Gebhardt	Projektleiter der Arbeitsgemeinschaft Additive Manufacturing des VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau)
Dipl.-Ing. Andreas Graichen	Siemens AG, Center of Competence Additive Manufacturing
Dr. Ingmar Kumpmann	Deutscher Gewerkschaftsbund (DGB), Referent für Industrie- und Dienstleistungspolitik

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Name	Institution/Unternehmen
Dr.-Ing. Bernhard Müller	Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Sprecher der Fraunhofer Allianz Generative Fertigung
Dipl.-Ing. Klaus Müller-Lohmeier	Festo AG & Co. KG, Leiter Advanced Prototyping Technology
Dr. Christoph Over	Geschäftsführer der C.F.K. CNC-Fertigungstechnik Kriftel GmbH
MinR Dr. Frank Schlie-Roosen	Bundesministerium für Bildung und Forschung, Referatsleiter 513: Photonik, Optische Technologien
Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Schmid	Lehrstuhl für Partikelverfahrenstechnik an der Universität Paderborn, Wissenschaftlicher Leiter des Direct Manufacturing Research Center (DMRC) der Universität Paderborn
Dr. Oliver Som	Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI
RD Dr. Uwe Sukowski	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Referat IV A 2: Investitionsgüterindustrie
Dr. Axel Thielmann	Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Prof. Dr. Frédéric Thiesse	Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik und Systementwicklung an der Universität Würzburg
Julian Wenz	IG Metall, Ressort Zukunft der Arbeit
Tobias Wenz	Geschäftsführer der Wenz-Mechanik GmbH und der Firma 3D-Laserdruck
Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt	Lehrstuhl für Fertigungstechnik an der Universität Duisburg-Essen, Vorsitzender des Fachausschusses »Additive Manufacturing« des VDI
Nikolai Zaepernick	EOS GmbH Electro Optical Systems Leiter Strategy & Business Development
MinR Thomas Zuleger	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Referatsleiter VI C 4: Industrieforschung für Unternehmen, Innovationsberatung

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.